ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Επιμέλεια : Χ. Π. Σταθάκης
Επίβλεψη : Δ. Ι. Παντελής, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα
Οκτώβριος 2012

Περίληψη

Η προσομοίωση της διαδικασίας της χύτευσης χρησιμοποιείται ευρέως στη σύγχρονη βιομηχανία ως εργαλείο προς αντικατάσταση των δαπανηρών -σε χρόνο, κόπο και χρήμα - πειραμάτων, με απώτερο στόχο την παραγωγή χυτών υψηλής ποιότητας. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης εξαρτάται από το σωστό καθορισμό του προβλήματος της χύτευσης. Οι παράμετροι της αριθμητικής προσομοίωσης πρέπει να καθοριστούν με ακρίβεια προκειμένου τα αποτελέσματα που θα λάβουμε από την προσομοίωση να περιγράφουν αξιόπιστα το πραγματικό φαινόμενο.

Μια πολύ βασική παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί στην όλη διαδικασία είναι ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας (ΣΜΘ, Heat Transfer Coefficient) στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού. Ο ΣΜΘ περιγράφει το σύνθετο φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας κατά τη χύτευση. Δεν είναι μια σταθερά αλλά μεταβάλλεται κατά τη στερεοποίηση και εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, μεταξύ των οποίων τα υλικά, οι θερμοκρασίες, οι συνθήκες χύτευσης και η γεωμετρία.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πείραμα χύτευσης ακριβείας καθαρού αλουμινίου με χρήση μηχανής φυγοκεντρικής χύτευσης. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, πραγματοποιήθηκε λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας. Θερμοστοιχείο τύπου-Κ ήταν τοποθετημένο σε χαρακτηριστικό σημείο του χυτού, προκειμένου να αποκαλυφθεί ο τρόπος απόψυξης του μετάλλου καθ' όλη τη διάρκεια της χύτευσης (στερεοποίησης και απόψυξης).

Διεξήχθη πλήθος προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποθηκεύθηκαν συστηματικά, ώστε να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για τη δημιουργία βάσης δεδομένων αποτελεσμάτων και για την εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου, ώστε να εξάγονται με ταχύτητα χρήσιμα συμπεράσματα.

Διερευνήθηκε εκτενώς το κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης ακριβείας, ένας συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (ΣΜΘ) με εκθετική μορφή $htc = at^{-b} + c$. Ο ΣΜΘ της μορφής αυτής, προτείνεται από τη βιβλιογραφία για διαφορετικές, όμως, συνθήκες χύτευσης. Η μορφή αυτή, για τη συγκεκριμένη περίπτωση χύτευσης, κρίθηκε ανεπαρκής να περιγράψει το φαινόμενο. Συνεπώς, η μελέτη επεκτάθηκε στη μελέτη διαφορετικών μορφών ΣΜΘ, καταλήγοντας σε μία πρόταση ΣΜΘ, η χρήση της οποίας αποδίδει ικανοποιητικά την πραγματικότητα, όπως αυτή περιγράφεται από το πείραμα.

Abstract

The use of casting simulation is widely used in modern foundry units as a tool towards the improvement of the quality of casting parts. The only competitive alternative way to achieve the production of good quality castings is the implementation of a series of casting experiments, a process which is time and money consuming.

In order for the simulation results to be realistic, all input parameters (including initial conditions, boundary conditions and materials properties) should be well defined. Heat Transfer Coefficient (H.T.C) is an interfacial boundary condition that describes the way heat flows from the casting to the mould, through the metal/mould interface during the casting process. It is a parameter with a great uncertainty, since it is highly affected by a number of factors, including the metal and mould materials, the metal and mould temperatures, the casting process and the casting geometry. Moreover, the values proposed in international literature are rather few and case sensitive.

The current diploma thesis is based on a pure aluminum casting experiment conducted using a centrifugal casting machine. A K-type thermocouple was embedded on the mould cavity, thus measuring the aluminum temperature history during the solidification and the cooling process.

Having obtained the experimental cooling curve, numerous numerical simulations of the casting process were conducted. The objective was to reveal the effect of HTC on cooling curves and to determine a HTC value that would provide good convergence between the experimental and the cooling curve. The results of all simulations were carefully and systematically saved, in order to be used for the training of an artificial neural network in the future.

According some papers of the international literarure, the HTC might be considered an exponential function of time $htc = at^{-b} + c$. The question would be: is there any combination of parameters a, b and c that could be successfully used for the simulation of centrifugal casting of aluminum? Thus, one of the main objectives of the current dissertation is to provide an answer. Since an exponential HTC proves to be an unsuccessful choice, other HTC patterns are tested. Finally, one HTC that gives good agreement between experimental and numerical results, is proposed.

TABLE OF CONTENTS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΧΥΤΕΥΣΗ

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Η χύτευση αποτελεί κατεργασία διατήρησης της μάζας, κατά την οποία το υλικό, που βρίσκεται σε τετηκυϊα κατάσταση, διοχετεύεται (αποχέεται) μέσω αγωγών, σε κατάλληλα προετοιμασμένη κοιλότητα υποδοχής (τύπος, καλούπι), όπου και στερεοποιείται. Η χύτευση επιτρέπει την κατασκευή αντικειμένων διαφόρων γεωμετριών, διαστάσεων και βάρους. Με την ορθή επιλογή τύπου είναι δυνατή η κατασκευή τεμαχίων μερικών χιλιοστών ή μερικών γραμμαρίων π.χ φερμουάρ ως και έλικες πλοίων πολλών τόνων, με κοιλότητες ή καμπυλότητες οι οποίες με άλλο τρόπο θα ήταν δύσκολο να δημιουργηθούν. Ως τεχνική μορφοποίησης η χύτευση δε χρησιμοποείται μόνο για μεταλλικές κατασκευές, (π.χ από χυτοσίδηρο, αλουμίνιο, χαλκό, ψευδάργυρο, μόλυβδο), αλλά και για μη μεταλλικά χυτά αντικείμενα (π.χ πολυμερικά, γυάλινα, κεραμικά).

Η χύτευση πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 3.500 π.Χ. στη Μεσοποταμία και χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή χάλκινων εξαρτημάτων, κυρίως επίπεδων, με καλούπια από πέτρα ή ψημένο πηλό. Γύρω στο 2.000 π.Χ. η χύτευση εξελίχθηκε περισσότερο. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν πυρήνες από ψημένο πηλό (αντίστοιχες με τις σημερινές “καρδιές”), για να φτιάχνονται εσωτερικές κοιλότητες μέσα στα χυτά. [04]

Σχήμα 1.1: Χύτευση

Η τεχνολογία της χύτευσης εξελίχθηκε στη συνέχεια από τους Κινέζους γύρω στο 1.500 π.Χ.. Οι Κινέζοι, παρά το ότι δεν είχαν χρησιμοποιήσει μέχρι τότε τη χύτευση, την υιοθέτησαν και την ανέπτυξαν, ιδιαίτερα στον τομέα του καλουπιού. Η αρχαιολογική σκαπάνη έχει ανακαλύψει καλούπια κατασκευασμένα με ξεχωριστή τέχνη. Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν διαιρετά καλούπια με πολλά εξαρτήματα που προσδένονταν μεταξύ τους (μέχρι και τριάντα). Εκτός από τους Κινέζους, ιδιαίτερη τέχνη στη χύτευση παρουσίασαν και οι Ινδοί, που χύτευαν χαλκό και μπρούντζο για εργαλεία, όπλα, σκεύη κ.λπ.. Τέλος, η χύτευση του σιδήρου πρωτοεμφανίστηκε γύρω στα 1000 π.Χ. στη Συρία και στην Περσία.

Σήμερα η χύτευση είναι μία από τις σημαντικότερες κατεργασίες μορφοποίησης προϊόντων. Υπάρχουν ειδικές μονάδες για την παραγωγή χυτών αντικειμένων, που ονομάζονται **χυτήρια** και που παράγουν μεταλλικά προϊόντα, σχεδόν στην τελική τους μορφή. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μεταλλικά υλικά είναι ο χυτοσίδηρος, ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο μπρούντζος, ο ορείχαλκος, το μαγνήσιο και τα κράματα του ψευδαργύρου. Με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι χύτευσης. Μία κατηγοριοποίηση βασίζεται στο είδος του καλουπιού.

Έτσι, η χύτευση διακρίνεται αρχικά σε :

- **Χύτευση σε καλούπια μίας χρήσης** *(χύτευση σε άμμο, γύψο, κεραμικό καλούπι κ.λπ.). Τα καλούπια σε αυτού του τύπου τη χύτευση καταστρέφονται προκειμένου να αποκαλυφθεί το χυτό.*
- **Χύτευση σε καλούπια πολλαπλών χρήσεων** *(χύτευση με βαρύτητα, υπό πίεση, φυγοκεντρική χύτευση κ.λπ.). Τα καλούπια σε αυτού του τύπου τη χύτευση χρησιμοποιούνται για πολλές συνεχόμενες χυτεύσεις.*

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται σύνοπτικά τα είδη της χύτευσης καθώς και τα κυριότερα υλικά τα οποία τα οποία χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση.[4]

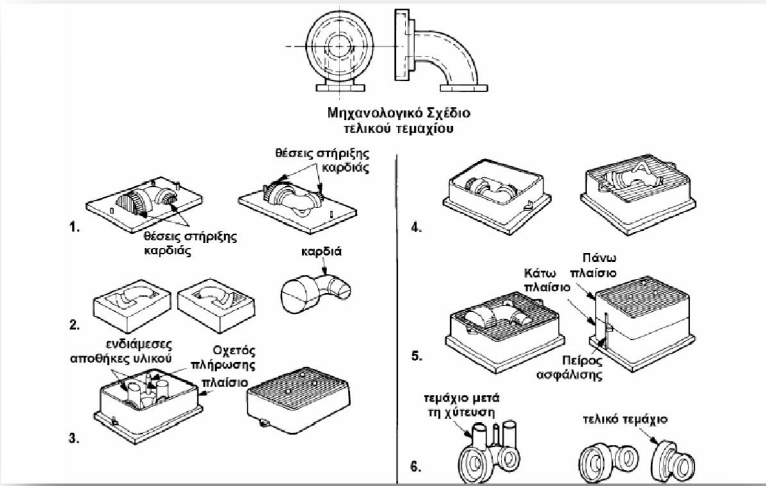
	Χύτευση	Περιγραφή	Υλικά
νέα χρήση του μοντέλου και καταστροφή του καλουπιού	Σε άμμο	το καλούπι κατασκευάζεται από άμμο γύρω από ξύλινο ή μεταλλικό μοντέλο.	όλα τα κοινά υλικά
	Σε κέλυφος	Το καλούπι κατασκευάζεται από άμμο και ρητίνη που σκληραίνει τοπικά γύρω από θερμαινόμενο μοντέλο.	Κυρίως σιδηρούχα υλικά, χαλκός και αλουμίνιο
	Σε γύψο	το καλούπι γίνεται με εμβάπτιση σε γύψο. Το καλούπι ψήνεται, αφού βγει το μοντέλο.	κυρίως αλουμίνιο και χαλκός
	Σε κεραμικό καλούπι	το καλούπι γίνεται με εμβάπτιση σε πυρίμαχα υλικά.	όλα τα κοινά υλικά
Νέα χρήση του καλουπιού	Σε μήτρα	Το καλούπι είναι μεταλλικό Το λιωμένο μέταλλο συμπιέζεται σε μήτρα με μεγάλη πίεση.	Κυρίως ψευδάργυρος, μαγνήσιο, αλουμίνιο και μερικοί χάλυβες
	Με χαμηλή πίεση	Το λιωμένο μέταλλο ρέει μέσα στο καλούπι με χαμηλή πίεση.	κυρίως αλουμίνιο
	Σε μόνιμο καλούπι	Το καλούπι είναι μεταλλικό και χωρισμένο σε δύο τμήματα. Το λιωμένο μέταλλο ρέει στο καλούπι με τη βαρύτητα.	κυρίως μη σιδηρούχα υλικά
	Φυγοκεντρική	Η χύτευση γίνεται σε περιστρεφόμενο καλούπι μέσω της φυγόκεντρης δύναμης	τα περισσότερα μέταλλα
	Σφυρηλάτησης	Το λιωμένο μέταλλο συμπιέζεται σε μήτρα από ένα έμβολο, όπως στη σφυρηλάτηση. Κυρίως μη σιδηρούχα υλικά	Κυρίως μη σιδηρούχα υλικά
Καταστροφή του καλουπιού και καταστροφή του μοντέλου	Με την τεχνική του χαμένου κεριού	Το μοντέλο κατασκευάζεται από κερί ή πλαστικό και λιώνει δημιουργώντας το καλούπι.	χάλυβες, μη σιδηρούχα μέταλλα
	Με εξατμιζόμενο μοντέλο	Το μοντέλο κατασκευάζεται από πολυστυρένιο και εξατμίζεται, όταν έρθει σε επαφή με το λιωμένο μέταλλο.	όλα τα μέταλλα, κυρίως σίδηρος

Πίνακας 1.Είδη χύτευσης.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΜΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΑΜΜΟ

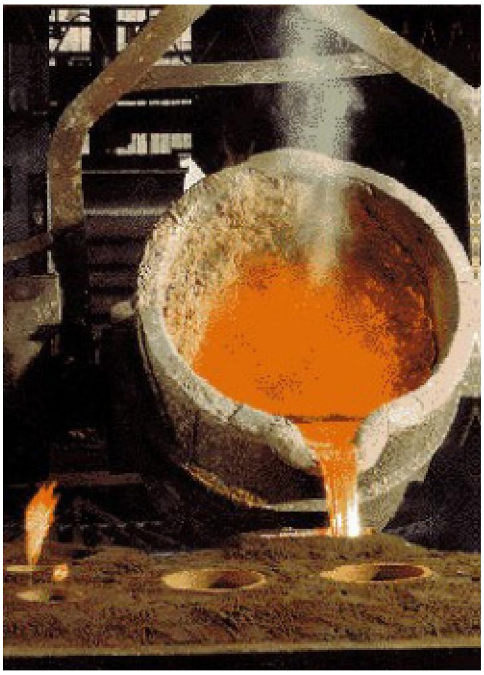
Η χύτευση σε άμμο είναι η παραδοσιακή μέθοδος χύτευσης, η οποία χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες. Ακόμα και σήμερα, μεγάλο ποσοστό της παραγωγής χυτών αντικειμένων πραγματοποιείται με αυτή τη μέθοδο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την άμμο (SiO2) για τη δημιουργία του καλουπιού, εκμεταλλευόμενη το μικρό της κόστος και την αντίστασή της στις υψηλές θερμοκρασίες. Η άμμος συνήθως χρησιμοποιείται αναμεμειγμένη με διάφορα πρόσθετα που αυξάνουν ακόμα τις ιδιότητές της. Τέτοια πρόσθετα είναι η άργιλος που χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό και το νερό. Ένα τυπικό παράδειγμα χύτευσης σε άμμο φαίνεται στο σχήμα 1.2. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται τα στάδια στα οποία πραγματοποιείται η χύτευση αυτή. [07]



Σχήμα 1.2 : Χύτευση σε άμμο

Η πρώτη εργασία στη χύτευση με άμμο είναι η δημιουργία του **μοντέλου** (βήμα 1 του σχήματος). Το μοντέλο είναι αντίγραφο του τεμαχίου που πρόκειται να χυτευθεί και φτιάχνεται κυρίως από ξύλο ή μέταλλο, ανάλογα με τον αριθμό των χυτεύσεων που θα γίνουν και το μέγεθος του χυτού. Μοντέλα από ξύλο έχουν μικρό κόστος και είναι ιδανικά για λίγες χυτεύσεις. Συνήθως φτιάχνονται από ξύλο καρυδιάς ή βελανιδιάς και γενικά από ξύλα που κατεργάζονται εύκολα. Τα μεταλλικά μοντέλα έχουν μεγαλύτερο κόστος και φτιάχνονται από αλουμίνιο, χυτοσίδηρο και μπρούντζο, ενώ μοντέλα φτιάχνονται και από συνθετικές ρητίνες, γύψο κ.λπ.

Για την περίπτωση που το αντικείμενο που πρόκειται να χυτευθεί έχει εσωτερική κοιλότητα, χρησιμοποιείται η **καρδιά**, δηλαδή ένας πυρήνας που θα παραμείνει κατά τη διάρκεια της χύτευσης μέσα στο καλούπι και θα εξασφαλίσει τη διαμόρφωση της κοιλότητας. Οι καρδιές μπορούν να είναι κι αυτές από άμμο και φτιάχνονται σε ειδικά, για το σκοπό αυτό, πλαίσια (βήμα 2). Η κατασκευή των καρδιών απαιτεί και αυτή ιδιαίτερη προσοχή ως προς τις διαστάσεις και τη μορφή και περιλαμβάνει, εκτός από την καρδιά, και τα σημεία στήριξής της στο καλούπι. Στο βήμα 3 φαίνεται το πάνω πλαίσιο του καλουπιού, στο οποίο έχει τοποθετηθεί το μισό μοντέλο, ο **οχετός πλήρωσης** και οι **ενδιάμεσες αποθήκες υλικού**. Οι ενδιάμεσες αποθήκες υλικού εκτός από την αποφυγή δημιουργίας κενών στο χυτό, όπως ήδη αναφέρθηκε, παίζουν εδώ και το ρόλο των εξαεριστικών, για να απάγονται τα αέρια που δημιουργούνται κατά τη χύτευση. Στη διπλανή εικόνα στο βήμα 3 φαίνεται το ίδιο πλαίσιο, αφού συμπληρώθηκε με άμμο και κατόπιν αφαιρέθηκαν με προσοχή το μοντέλο από τη βάση, οι αποθήκες και ο οχετός πλήρωσης. Στο βήμα 4 διαμορφώνεται αντίστοιχα το κάτω πλαίσιο με το άλλο μισό μοντέλο, ενώ στο βήμα 5 τοποθετείται η καρδιά στο κάτω πλαίσιο και συμπληρώνεται το καλούπι με το πάνω πλαίσιο. Τέλος, μετά τη χύτευση (βλ. σχήμα 1.3), την απόψυξη και τον καθαρισμό, στο βήμα 6 φαίνεται το τελικό τεμάχιο πριν και μετά την αφαίρεση των δύο ενδιάμεσων αποθηκών και του οχετού πλήρωσης. [04]



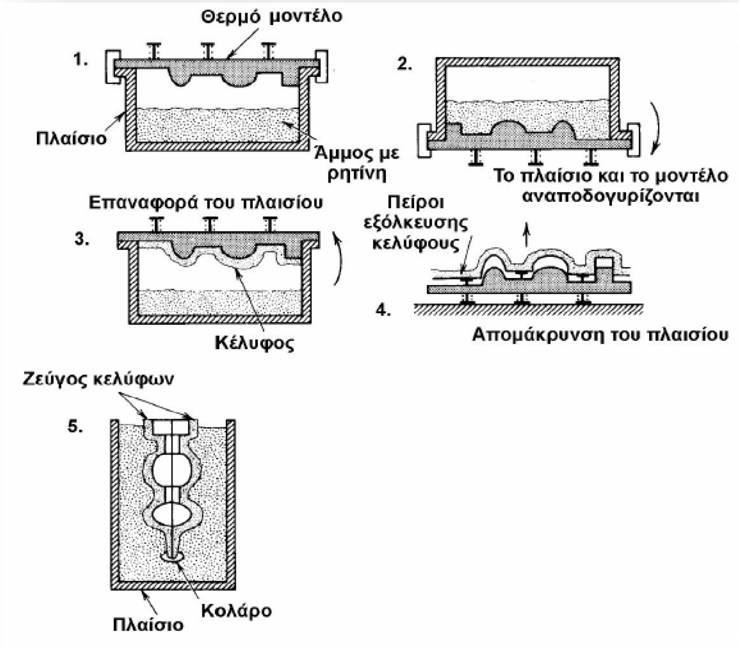
Σχήμα 1.3 : Χύτευση σε καλούπια από άμμο

Όλα τα στάδια που προαναφέρθηκαν απαιτούν λεπτούς χειρισμούς και επιδεξιότητα από τον τεχνίτη που πραγματοποιεί τη χύτευση. Ειδικά η κατασκευή του μοντέλου απαιτεί μεγάλη επιδεξιότητα μια και πρέπει να έχει προβλεφθεί να απομακρύνεται εύκολα, χωρίς να καταστρέφει το αποτύπωμα στην άμμο, καθώς και η συστολή που θα υποστεί το τεμάχιο μετά την απόψυξή του. Αντίστοιχη επιδεξιότητα απαιτείται και στην κατασκευή των

πυρήνων (καρδιών). Η άμμος που χρησιμοποιείται στη χύτευση χαρακτηρίζεται από το μέγεθος των κόκκων της. Έτσι, για μεγάλα κομμάτια χρησιμοποιείται η χονδρόκοκκη άμμος, ενώ λεπτόκοκκη άμμος χρησιμοποιείται για χύτευση μικρών αντικειμένων. Επίσης, η άμμος μπορεί να είναι υγρή (πράσινη) για τη χύτευση μικρών αντικειμένων, ενώ για τη χύτευση μεγαλυτέρων χρησιμοποιείται άμμος αποξηραμένη σε φούρνους. Για τη δημιουργία των καλουπιών με άμμο, χυτών ιδιαίτερα μεγάλων διαστάσεων, χρησιμοποιείται ειδική μηχανή τροφοδοσίας της άμμου.[2]

ΧΥΤΕΥΣΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Η μέθοδος αυτή πρωτοεμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου. Στη μέθοδο αυτή το υλικό από το οποίο φτιάχνεται το καλούπι είναι λεπτή άμμος και 2,5-4% θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Το μοντέλο είναι μεταλλικό και θερμαίνεται σε θερμοκρασία 175-270°C. Η διαδικασία της χύτευσης κελύφους ακολουθεί πέντε στάδια που περιγράφονται παρακάτω και φαίνονται στο σχήμα 1.4. [07]



Σχήμα 1.4 : Χύτευση κελύφους

Τα στάδια αυτά είναι :

1. Το μείγμα από την άμμο και τη θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη τοποθετείται σε ένα πλαίσιο που σκεπάζεται από πάνω με το θερμό μεταλλικό μοντέλο (εικόνα 1). Το πλαίσιο αναποδογυρίζεται και η άμμος πέφτει πάνω στο μοντέλο (εικόνα 2). Η θερμότητα του μοντέλου σκληραίνει τοπικά μία περιοχή πάχους περίπου 3,2 mm από την άμμο και τη ρητίνη και δημιουργεί το κέλυφος.
2. Το πλαίσιο γυρίζεται στην αρχική του θέση, η άμμος πέφτει στη βάση του πλαισίου και το κέλυφος παραμένει με το μοντέλο (εικόνα 3). Το μοντέλο μαζί με το κέλυφος τοποθετούνται σε φούρνο για μερικά λεπτά, ώστε το κέλυφος να σκληρυνθεί καλύτερα και να λάβει την τελική του μορφή.
3. Το κέλυφος απομακρύνεται από το μοντέλο (εικόνα 4).
4. Δύο ίδια τμήματα του κελύφους ενώνονται και δημιουργούν το καλούπι (εικόνα 5).
5. Το καλούπι που δημιουργήθηκε με τον τρόπο αυτό, τοποθετείται σε ένα πλαίσιο με άμμο για υποστήριξη του κελύφους κατά τη χύτευση.

Στη μέθοδο αυτή, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στις διαστάσεις του χυτού είναι μόνο μερικά εκατοστά του χιλιοστού. Αυτό οφείλεται στη σχεδόν μηδενική συρρίκνωση που υφίσταται το κέλυφος. [2]

ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΞΑΤΜΙΖΟΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που γίνεται μικρός αριθμός χυτεύσεων. Στις περιπτώσεις αυτές, το κόστος κατασκευής των μοντέλων γίνεται ιδιαίτερα υψηλό. Έτσι, με τη μέθοδο αυτή, κατασκευάζονται μοντέλα από πολυστυρένιο, γύρω από τα οποία τοποθετείται άμμος και δημιουργείται το καλούπι. Το μοντέλο παραμένει μέσα στο καλούπι και όταν έρθει σε επαφή με το λιωμένο μέταλλο εξατμίζεται, δημιουργώντας έτσι την κοιλότητα του καλουπιού. Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να χυτευθούν αρκετά πολύπλοκα αντικείμενα με μικρό κόστος.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΓΥΨΟ

Σε αυτή τη μέθοδο χύτευσης, το καλούπι είναι φτιαγμένο από γύψο με πρόσθετα, όπως είναι ίνες αμιάντου, ορυκτά του μαγνησίου και του πυριτίου. Τα υλικά αυτά αναμειγνύονται με νερό και το διάλυμα χύνεται και περιβάλλει το μοντέλο. Όταν το διάλυμα στερεοποιηθεί, απομακρύνεται το μοντέλο και το καλούπι, αφού ξηραίνεται σε θερμοκρασία 200°C περίπου, είναι έτοιμο για τη χύτευση. Επειδή το καλούπι από γύψο αντέχει μέχρι τη θερμοκρασία των 1200°C, η μέθοδος χύτευσης με γύψο χρησιμοποιείται μόνο για χύτευση αλουμινίου, μαγνησίου, ψευδαργύρου και κραμάτων του χαλκού. Η χύτευση με γύψο δίνει πολύ καλή επιφάνεια του χυτού και λόγω της μικρής συρρίκνωσης του καλουπιού δίνει πολύ μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις. Έτσι η μέθοδος αυτή και η μέθοδος χύτευσης με την τεχνική του χαμένου κεριού και της χύτευσης σε κεραμικό καλούπι (που περιγράφονται παρακάτω) είναι γνωστές ως μέθοδοι **χύτευσης ακριβείας**.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΚΕΡΑΜΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ

Η χύτευση σε κεραμικό καλούπι δε διαφέρει πολύ από τη χύτευση σε γύψο. Η ουσιαστική διαφορά βρίσκεται στα υλικά που χρησιμοποιούνται για το καλούπι. Το αντίστοιχο διάλυμα, που χύνεται γύρω από το μοντέλο για να δημιουργηθεί το καλούπι, είναι από ανθεκτικά υλικά στις υψηλές θερμοκρασίες, όπως το οξείδιο του Αλουμινίου (Al_2O_3), το οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και το ορυκτό ζίρκον ($ZrSiO_4$). Τα υλικά αυτά δίνουν τη δυνατότητα χύτευσης μετάλλων και κραμάτων με υψηλό σημείο τήξης, όπως είναι τα σιδηρούχα κράματα. Η μέθοδος αυτή έχει σχετικά μεγάλο κόστος, αλλά δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ποιότητα της επιφάνειας του χυτού και στην ακρίβεια των διαστάσεών του. [01]

ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΚΑΛΟΥΠΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΜΟΝΙΜΟ ΚΑΛΟΥΠΙ

Στη μέθοδο αυτή το καλούπι είναι κατασκευασμένο, ανάλογα με το υλικό που θα χυτευθεί, από χυτοσίδηρο, χάλυβα, μπρούντζο ή πυρίμαχα κράματα μετάλλων. Το καλούπι είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα και κλείνει με μηχανικό τρόπο. Μετά την εισαγωγή του λιωμένου μετάλλου, το καλούπι ανοίγει και το χυτό απομακρύνεται. Η παροχή του λιωμένου μετάλλου γίνεται με βαρύτητα σε αντίθεση με τη **χύτευση σε μήτρα**, όπου το λιωμένο μέταλλο αναγκάζεται να εισέλθει στο καλούπι με πίεση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για μη σιδηρούχα κράματα, μόλυβδο, ψευδάργυρο, κράματα μαγνησίου, μπρούντζο και χυτοσίδηρο και έχει πλεονέκτημα τη μεγάλη της παραγωγικότητα. Τυπικά παραδείγματα προϊόντων που παράγονται με αυτή τη μέθοδο είναι έμβολα μηχανών εσωτερικής καύσης, block κυλίνδρων για συμπιεστές ψυγείων, εξαρτήματα γραφομηχανών από αλουμίνιο κ.λπ.. Η χύτευση σε μόνιμο καλούπι γίνεται συνήθως χειροκίνητα, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται και με μηχανικό τρόπο. Στην περίπτωση αυτή το καλούπι μεταφέρεται σε διάφορες θέσεις εργασίας για καθαρισμό, τοποθέτηση των καρδιών, κλείσιμο, ψύξη, άνοιγμα και απομάκρυνση του χυτού.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΠΙΕΣΗ

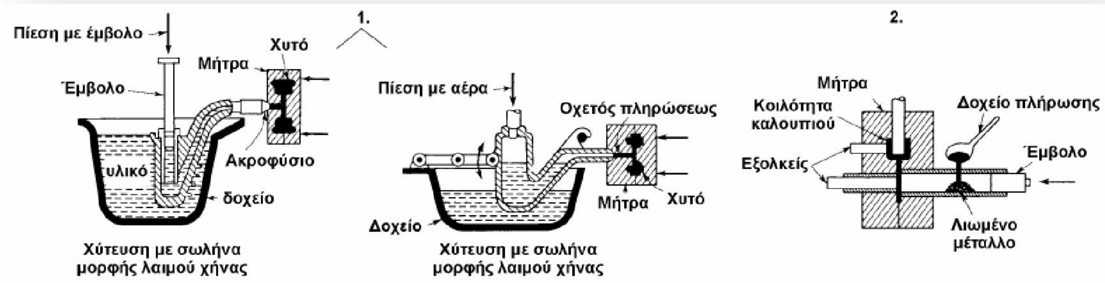
Η χύτευση με χαμηλή πίεση διαφέρει από τη χύτευση σε μόνιμο καλούπι στη διαδικασία εισόδου του λιωμένου μετάλλου. Το λιωμένο μέταλλο βρίσκεται σε ειδικό δοχείο που θερμαίνεται συνεχώς και αναγκάζεται να εισέλθει στο καλούπι μέσω πίεσης, η οποία παραμένει μέχρι το υλικό να στερεοποιηθεί. Μόλις σταματήσει η πίεση, το χυτό απομακρύνεται, ενώ το παραμένον λιωμένο μέταλλο στον αγωγό επιστρέφει στο δοχείο. Η μέθοδος αυτή δίνει μεσαίας τάξης ποιότητα επιφάνειας στο χυτό και διαστατική ακρίβεια. Χρησιμοποιείται για τη χύτευση αλουμινίου σε γύψινα καλούπια και χυτοσιδήρου. Παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η **χύτευση σε κενό**. Στη μέθοδο αυτή, η άμμος συγκρατείται στο καλούπι με τη βοήθεια κενού. Τα δύο τμήματα του καλουπιού επικαλύπτονται με λεπτό στρώμα πλαστικού, ώστε να διατηρείται το κενό αυτό. Τα μοντέλα στη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται, όπως και στις προηγούμενες μεθόδους.[01]

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΜΗΤΡΑ

Η χύτευση σε μήτρα μοιάζει με τη χύτευση σε μόνιμο καλούπι και σε χαμηλή πίεση. Στη μέθοδο αυτή ασκείται πίεση στο λιωμένο μέταλλο που βρίσκεται σε ένα δοχείο, ώστε να γεμίσει ταχύτατα την κοιλότητα μιας μήτρας. Οι μήτρες αυτές κατασκευάζονται από χαλυβοκράματα ή ανθρακούχους χάλυβες, ανάλογα του υλικού που πρόκειται να χυτευθεί. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι :

- *Μεγάλη παραγωγικότητα. Η παραγωγή μπορεί να φτάσει τα 1000 κομμάτια την ώρα, ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος του κομματιού που θα χυτευθει*
- *Μεγάλη διαστατική ακρίβεια και καλή ποιότητα επιφάνειας στα χυτά*
- *Χυτά με αυξημένη μηχανική αντοχή και*
- *Πολλή μικρή συρρίκνωση λόγω συστολής στο χυτό, που οφείλεται στην πίεση που ασκείται κατά τη χύτευση και τη στερεοποίηση.*

Η χύτευση σε μήτρα εμφανίζεται σε δύο βασικούς τύπους, στη χύτευση, όπου το λιωμένο μέταλλο βρίσκεται σε θερμό θάλαμο μέσα στη μηχανή χύτευσης (που λέγεται **χυτόπρεσα**), και στη χύτευση, όπου το λιωμένο μέταλλο λιώνει εκτός της μηχανής χύτευσης και τοποθετείται σε θάλαμο, όπου συμπιέζεται και οδηγείται στη μήτρα. Στο *σχήμα 1.5* φαίνονται οι δύο αυτές μέθοδοι. Στις δύο πρώτες εικόνες του σχήματος, το λιωμένο μέταλλο μεταφέρεται στην κοιλότητα του καλουπιού με τη βοήθεια πίεσης που ασκείται από ένα έμβολο ή με πίεση από αέρα και μέσω ενός αγωγού σε μορφή “λαιμού χήνας”. Η μέθοδος αυτή λέγεται και **μέθοδος θερμού θαλάμου**. Στη χύτευση της εικόνας 2 το λιωμένο μέταλλο μεταφέρεται με δοχείο και χύνεται στο εσωτερικό ενός αγωγού. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια εμβόλου, το λιωμένο μέταλλο συμπιέζεται και γεμίζει τη μήτρα. Η μέθοδος αυτή λέγεται και **μέθοδος ψυχρού θαλάμου**. Και στις δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις, το έτοιμο χυτό απομακρύνεται με κατάλληλους εξολκείς και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.[02]



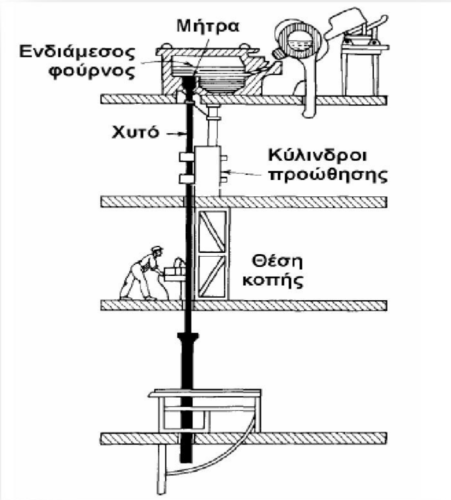
Σχήμα 1.5 : Χύτευση σε μήτρα

Χυτευση σφυρηλατησης

Η χύτευση με σφυρηλάτηση είναι σχετικά νέα μέθοδος χύτευσης και πρωτοεμφανίστηκε στη δεκαετία του ‘60. Η μέθοδος αυτή μοιάζει με τη σφυρηλάτηση, επειδή χρησιμοποιείται μία μήτρα στην οποία μέσα χύνεται το λιωμένο μέταλλο, ένα έμβολο που διαμορφώνει το υλικό με πίεση (όπως στη σφυρηλάτηση) και ένας εξολκέας για να απομακρύνει το χυτό.

Συνεχης Χυτευση

Στη συνεχή χύτευση εισέρχεται λιωμένο μέταλλο από το ένα άκρο ενός καλουπιού, που είναι ανοικτό και από τις δύο άκρες, ψύχεται απότομα και εξέρχεται στερεοποιημένο από το άλλο άκρο του καλουπιού, έχοντας μία συγκεκριμένη μορφή. Υλικά που χυτεύονται με αυτή τη διαδικασία είναι ο χαλκός, ο μπρούντζος, το αλουμίνιο και σε ειδικές περιπτώσεις χάλυβας, χυτοσίδηρος κ.λπ. Μία τυπική διαδικασία συνεχούς χύτευσης φαίνεται στο σχήμα 1.5. Το υλικό χύνεται μέσα στο καλούπι ή σε μήτρα από ένα ενδιάμεσο φούρνο. Το πάνω μέρος του καλουπιού ψύχεται με ψεκασμό νερού, ώστε το λιωμένο μέταλλο να ψύχεται και να στερεοποιείται γρήγορα. Το στερεό πλέον μέταλλο απομακρύνεται συνεχώς με τη βοήθεια περιστρεφόμενων κυλίνδρων και κόβεται στο μήκος που είναι επιθυμητό. Η διαδικασία ξεκινά με μια αρχική ράβδο στην οποία χύνεται το πρώτο μέταλλο.



Σχήμα 1.6 : Συνεχής χύτευση

Η συνεχής χύτευση χρησιμοποιείται για παραγωγή τυποποιημένων ράβδων διαφόρων διατομών, είτε αυτές είναι κοίλες είτε γεμάτες. Οι διαστάσεις μπορούν να κυμαίνονται από μερικά mm σε διάμετρο, έως περίπου 250mm, ενώ το μήκος των ράβδων που παράγονται φθάνει τα 6m. Οι μήτρες ή τα καλούπια που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από χαλκό ή γραφίτη, είναι απλά στην κατασκευή τους και οικονομικά.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΧΑΜΕΝΟΥ ΚΕΡΙΟΥ

Η μέθοδος χύτευσης χαμένου κεριού *(Lost Wax Casting)*, εφαρμόζεται από αρχαιοτάτων χρόνων, εμφανίστηκε μάλιστα το 3000 π.Χ.. Αφορά βάρη χυτών από 5 gr έως 25 kg, ενώ είναι κατάλληλη για πάχος τοιχώματος από 1 έως 75 mm. Εξαιτίας του ειδικού εξοπλισμού που απαιτεί η μέθοδος, λανθασμένα επικρατεί η άποψη ότι είναι μία πολύπλοκη διαδικασία. Η μέθοδος αυτή χύτευσης ακριβείας, με χρήση κεριού, χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην οδοντιατρική. Στη συνέχεια υιοθετήθηκε από τη βιομηχανία για χυτεύσεις τεμαχίων πολύπλοκης δομής και μεγάλων απαιτήσεων ακριβείας και αργότερα χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην κατασκευή κοσμημάτων. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση της μεθόδου από άλλες μεθόδους χύτευσης είναι το γεγονός ότι το καλούπι αποτελείται από ένα μόνο κομμάτι (δεν είναι διαιρετό), εξασφαλίζοντας μεγάλη ακρίβεια (έως και 0,07mm) και υψηλή ποιότητα χυτών.[11]

Η εκτέλεση του τυπώματος (investment) γίνεται με δυο τρόπους:

§ Με δημιουργία κεραμικού κελύφους (*ceramic shell process*)

§ Με στέρεο καλούπι (*solid mold investment casting*)

Τα βήματα που περιλαμβάνει η μέθοδος, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και παρουσιάζονται συνοπτικά ακολούθως:

Σχήμα 1.7 : Χύτευση με την τεχνικη του χαμενου κεριου.

i. *Το μοντέλο φτιάχνεται σε διαιρούμενο καλούπι με έγχυση κεριού ή πλαστικού.*
ii. *Το μοντέλο απομακρύνεται από το καλούπι του.*
iii. *Δημιουργείται το συνολικό μοντέλο της χύτευσης.*
iv. *Το μοντέλο βυθίζεται μερικές φορές σε διάλυμα πυρίμαχων υλικών, όπως είναι η άμμος και συνδετικών υλικών, όπως το πυριτικό αιθύλιο και το πυριτικό νάτριο. Αφού κάθε φορά ξηραθεί το στρώμα της επικάλυψης, το μοντέλο ξαναβυθίζεται στο διάλυμα, ώστε να αυξηθεί το πάχος της επικάλυψης (3 έως 6mm).*
v. *Το μοντέλο βυθίζεται σε στόκο και επικαλύπτεται με αυτόν.*
vi. *Το έτοιμο μοντέλο.*
vii. *Το επικαλυμμένο μοντέλο τοποθετείται σε φούρνο γύρω στους 1100°C, όπου λιώνει το κερί ή το πλαστικό και απομένει το έτοιμο καλούπι.*
viii. *Πραγματοποιείται η χύτευση.*
ix. *Το καλούπι καθαρίζεται σπάζοντας την επικάλυψη.*
x. *Έτοιμα χυτά κομμάτια, αφού αφαιρεθούν οι αγωγοί τροφοδοσίας και η χοάνη πληρώσεως.[10]*

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

ΧΡΗΣΗ ΚΕΡΙΟΥ

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ομοιωμάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κερί και πλαστικό (πολυστυρένιο). Η χρήση του κεριού είναι σαφώς πιο διαδεδομένη για τέτοιου είδους χυτεύσεις, συνήθως με κάποιες προσμίξεις, όπως πλαστικό, ρητίνες, αντιοξειδωτικά και χρωστικές ουσίες. Τα πιο διαδομένα είδη κεριού είναι οι παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά και μάλιστα τα παραπάνω δύο υλικά είθισται να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, γιατί οι ιδιότητές τους αλληλοσυμπληρώνονται. Ο λόγος της ευρύτατης χρήσης των παρακάτω υλικών είναι τα κατά γενική ομολογία καλά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή το χαμηλό κόστος, η μεγάλη διαθεσιμότητα, η καλή λιπαντικότητα και το χαμηλό ιξώδες. Ωστόσο, η ψαθυρότητα και το μεγάλο ποσοστό συρρίκνωσης που εμφανίζουν, περιορίζουν σε ορισμένες περιπτώσεις τη χρήση τους. Υπάρχουν και άλλα είδη κεριών, φυσικά ή τεχνητά που ανάλογα με τις ιδιότητές τους καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέτοια είναι ο οζοκηρίτης (ozocerite), το μελισσοκέρι (beeswax), και φυτικά κεριά όπως τα Candelilla και Carnauba. Η σύσταση των κεριών της μεθόδου δίνεται κατά προσέγγιση στον παρακάτω πίνακα:

Συστατικά	Περιεκτικότητα %
Κεριά (συνήθως περισσότερων του ενός είδους)	*30 -70*
Ρητίνη (ενός ή δύο ειδών)	*20 - 60*
Πλαστικό (ενός είδους)	*0 -20*
Άλλα	*0 -5*

Πίνακας 2: Τα επιμέρους συστατικά των κεριών που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο χαμένου κεριού

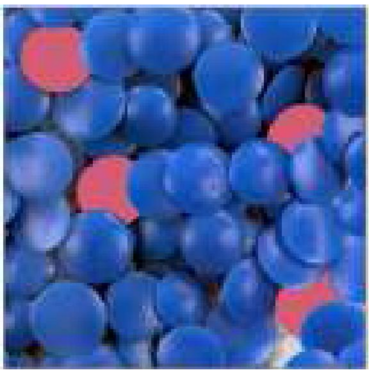
Χρηση fillers

Για τη μείωση της συρρίκνωσης του κεριού κατά τη στερεοποίηση, χρησιμοποιούνται στερεά υλικά σε μορφή σκόνης, τα λεγόμενα fillers. Τα υλικά αυτά δεν διαλύονται κατά τη θέρμανση του κεριού, αφού έχουν σημείο τήξης πολύ μεγαλύτερο από το σημείο τήξης του κεριού. Έτσι, μειώνουν τη διαστολή του κατά τη θέρμανση και αντίστοιχα τη συστολή του κατά την ψύξη.

Κριτηρια επιλογης του καταλληλου κεριου

Κατά την κατασκευή ή επιλογή κεριού για τη μέθοδο αυτή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω απαιτούμενες ιδιότητες:

- **Ευκολία έγχυσης:** Θα πρέπει να ελέγχονται οι ιδιότητες ρευστότητας, οι θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης, ο χρόνος που απαιτείται για την προετοιμασία πριν την έγχυση, οι επιφανειακές ιδιότητες και η δυνατότητα αναπαραγωγής, με ακρίβεια, της γεωμετρίας του προτύπου.
- **Εύκολη απομάκρυνση, επεξεργασία και εφαρμογή:** Θα πρέπει να ελέγχεται η λιπαντικότητα, η αντοχή, η σκληρότητα, η σταθερότητα και η ευκολία τήξης του κεριού.
- **Διαστασιολογική ακρίβεια:** Επιθυμούμε όσο το δυνατόν μικρότερο ποσοστό συρρίκνωσης στερεοποίησης, πορώδους και τάσης διάβρωσης.
- **Εύκολη αποκέρωση:** Είναι επιθυμητή όσο το δυνατό μεγαλύτερη τιμή ιξώδους και διαλυτότητα σε υψηλές θερμοκρασίες
- **Χαμηλό κόστος, διαθεσιμότητα, δυνατότητα ανακύκλωσης, μικρή τοξικότητα** (προτιμούνται οικολογικά κεριά).



Σχήμα 1.8 : Τύπος κεριού έγχυσης με ειδικές προσμίξεις

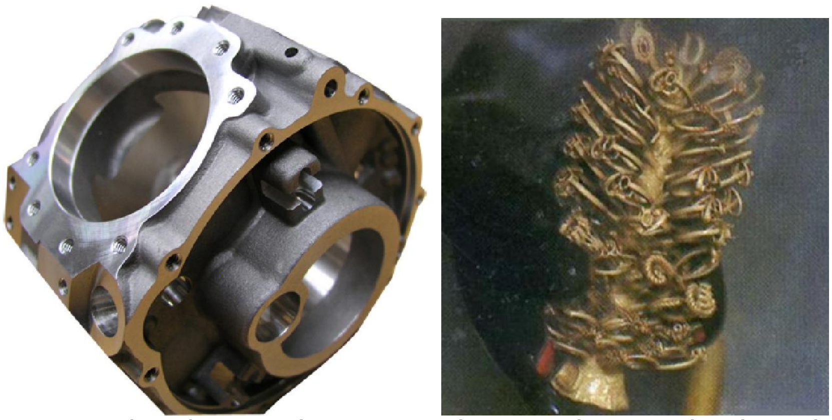
Χρηση Πλαστικων

Μετά το κερί, το πλαστικό είναι το αμέσως πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται. Το πιο συνηθισμένο είδος πλαστικού για την κατασκευή ομοιωμάτων είναι το πολυστυρένιο γενικής χρήσης που πλεονεκτεί σε σχέση με το κερί στο γεγονός ότι δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας προτυποποίησης σε διατάξεις με μεγάλο ρυθμό παραγωγής και στη εξαιρετική αντοχή του σε σημεία που η διατομή λεπταίνει πολύ. Κατά συνέπεια των παραπάνω, η αποθήκευση των προτύπων για μεγάλο χρονικό διάστημα πριν τη χρήση τους, δεν αλλοιώνει την ποιότητά τους. Παρόλα αυτά, δεν εφαρμόζονται εξίσου ευρέως με τα κεριά, λόγω της τάσης που έχουν να προκαλούν ρωγμές στο καλούπι κατά την απομάκρυνσή τους. Ακόμη, ο εξοπλισμός επεξεργασίας και έγχυσης που απαιτείται για τη χρήση τους είναι ιδιαίτερα ακριβός. Λόγω των παραπάνω, πλαστικό χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού μικρών τεμαχίων. Εκτός του πολυστυρενίου συναντάμε πρότυπα και από άλλα υλικά, όπως νάιλον, πολυαιθυλένιο και αιθυλική κυτταρίνη. Τέλος έχουν αναπτυχθεί και άλλα υλικά, τα οποία είναι υδατοδιαλυτά και περιορίζουν την πιθανότητα καταστροφής του καλουπιού κατά την απομάκρυνσή τους. Τέτοια είναι διάφορα μίγματα αλάτων, ναφθαλίνης και αφροί πολυστυρενίου.

Σχήμα 1.9: Ομοίωμα που εχει κατασκευαστει με εγχυση πλαστικων

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΧΑΜΕΝΟΥ ΚΕΡΙΟΥ

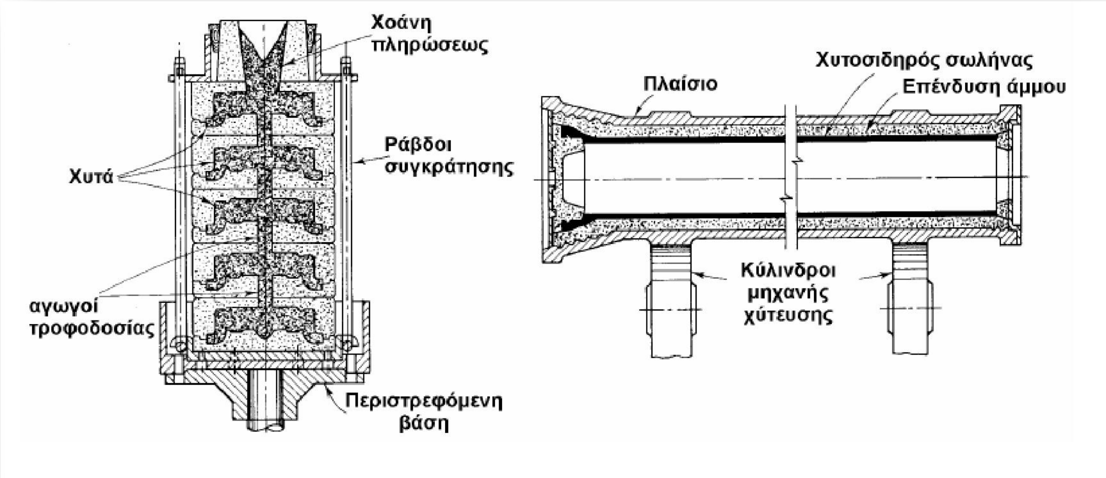
Η χύτευση χαμένου κεριού συναντάται κυρίως σε καλλιτεχνικά χυτήρια, σε εργαστήρια οδοντικών προσθέτων και στη βιομηχανία, σε περιπτώσεις σύνθετων τεμαχίων, όπως πτερύγια για στροβίλους. Άλλες χρήσεις της μεθόδου είναι σε αυτοκίνητα, σε computer, ηλεκτρονικές συσκευές και κάμερες, στη βιομηχανία όπλων, σε εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου και στα radar.[09]



Σχήμα 1.10: Παραγωγή χυτών με τη μέθοδο του χαμένου κεριού. Αριστερά φαίνεται ένα μηχανικό σκέλος, δεξιά κοσμήματα από χρυσό.

ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΗ ΧΥΤΕΥΣΗ (CENTRIFUGAL CASTING)

Στη φυγοκεντρική χύτευση χύνεται, με σταθερή παροχή, λιωμένο μέταλλο σε ένα περιστρεφόμενο μεταλλικό καλούπι. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις, που αναπτύσσονται με την περιστροφή, οδηγούν το λιωμένο μέταλλο στην εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού.



Σχήμα 1.11 : Κατακόρυφη και οριζόντια φυγοκεντρική χύτευση

Η φυγοκεντρική χύτευση βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε περιπτώσεις κατασκευής συμμετρικών τεμαχίων, με κυλινδρική ή σφαιρική μορφή, χυτοσίδηρους σωλήνες μεγάλων διαμέτρων, κυλίνδρους και γενικά τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής.. Το τήγμα αποτίθεται σε καλούπι που περιστρέφεται είτε σε οριζόντιο είτε σε κάθετο επίπεδο, ανάλογα με το μέγεθος του χυτού. Η πλήρωση του γίνεται σε απόσταση από τον άξονα περιστροφής και η μεταφορά του ρευστού επιτυγχάνεται μέσω των φυγόκεντρων δυνάμεων. [18]

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τις αναπτυσσόμενες φυγόκεντρες δυνάμεις σε ένα περιστρεφόμενο καλούπι για να εισαχθεί το τηγμένο μέταλλο στην κοιλότητα και να αναπαραχθεί το επιθυμητό σχήμα. Η πρώτη εφαρμογή έγινε στις αρχές του 19ου αιώνα στην Μ. Βρετανία και βρήκε βιομηχανική χρήση το 1848 στη Βαλτιμόρη για την κατασκευή σωλήνων. Τα αρχικά αντικείμενα που κατασκευάστηκαν με φυγοκεντρική χύτευση, ήταν δακτύλιοι σιδήρου και χάλκινοι σωλήνες. Με το πέρασμα των χρόνων βελτιώθηκαν τόσο η διαδικασία όσο και η ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών, επιτυγχάνοντας έτσι χυτά με καλύτερες μεταλλουργικές και μηχανικές ιδιότητες. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται ευρέως για την παρασκευή λεπτότοιχων σωλήνων από ατσάλι ή διμεταλλικά κράματα, για τη χημική, πετρελαϊκή και παράκτια βιομηχανία.

ΜΗΧΑΝΕΣ – ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Μια οριζόντια μηχανή φυγοκεντρικής χύτευσης πρέπει να μπορεί να εκτελεί τις παρακάτω διεργασίες με ακρίβεια και επαναληψιμότητα:

- *Περιστροφή του καλουπιού στην προκαθορισμένη ταχύτητα*
- *Έγχυση του ρευστού μετάλλου στο καλούπι*
- *Εξασφάλιση του κατάλληλου ρυθμού στερεοποίησης του χυτού*
- *Να επιτρέπει την εύκολη εξαγωγή των χυτών από τον τύπο*

ΚΑΛΟΥΠΙΑ

Στις οριζόντιες μηχανές χρησιμοποιούνται καλούπια που ψύχονται από ψεκασμό νερού και αποτελούνται από τέσσερα τμήματα: το κέλυφος, το στόμιο εισόδου του ρευστού μετάλλου, τις κεφαλές (καπάκια) και τους οδηγούς περιστροφής. Ανάλογα με την ποσότητα, τη γεωμετρία κα το είδος του μετάλλου υπάρχουν πολλά είδη καλουπιών, μόνιμα ή μη. Οι *μη μόνιμοι τύποι* είναι συνήθως κατασκευασμένοι από:

- **Πράσινη άμμο***: με πρόσμιξη στην πυριτική άμμο νερού, επεξεργασμένου τσιμέντου, συνδετικών, ρητινών, μπετονίτη κτλ.*
- **Ξηρή άμμο***: όπου η άμμος περισφίγγεται γύρω από ένα πρότυπο του επιθυμητού σχήματος και η στερεοποίησή της υποβοηθάται από τη χρήση διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης είναι σύνηθες να γίνεται επίχριση των καλουπιών στην εσωτερική τους επιφάνεια, για να αποκτούν μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχή στη διάβρωση από το καυτό μέταλλο.*

Τα *μόνιμα καλούπια* κατασκευάζονται από:

- **Ατσάλι***: σε χύτευση πολλών τεμαχίων και για περιπτώσεις ειδικών απαιτήσεων στερεοποίησης. Εξαιτίας της ευαισθησίας τους στα θερμικά φορτία πραγματοποιούνται προσμίξεις στη σύσταση τους και επιπλέον συνδυάζονται με κεραμικές επιστρώσεις αλουμίνας και ζιρκονίου στο εσωτερικό τους.*
- **Χαλκό***: εφαρμόζεται σε σπάνιες περιπτώσεις εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας που διαθέτουν και τη δυσκολία υπολογισμού των ακριβών διαστάσεων του.*

- **Γραφίτη**: *διακρίνονται για το χαμηλό κόστος και την εύκολη επεξεργασία τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως για χύτευση μικρών ποσοτήτων χάλκινων αντικειμένων. Διαθέτουν εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα και αντοχή στα θερμικά φορτία.*

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΓΧΥΣΗΣ

Η έγχυση συνήθως πραγματοποείται με τη χρήση χοάνης μέσω της οποίας το τηγμένο μέταλλο μεταφέρεται από τη συσκευή τήξης προς το καλούπι. Τα περισσότερα ελαττώματα των χυτών προκύπτουν μέσα σε αυτά τα λίγα δευτερόλεπτα. Μερικές παράμετροι που επηρεάζουν τις συνθήκες έγχυσης είναι:

i. ***Τυρβώδης ροή***: Η ποιότητα του χυτού επηρεάζεται σημαντικά από τη διαδικασία της έγχυσης. Η τυρβώδης ροή που προκαλείται κατά την έγχυση από μεγάλο ύψος ή από έντονους ρυθμούς ροής δεν πρέπει να αγνοείται. Η τύρβη δημιουργεί αέρια τα οποία εμφανίζονται ως κοιλότητες μετά τη δημιουργία του πλινθώματος και μπορεί επίσης να οξειδώσει το καυτό μέταλλο ώστε να σχηματίσει μεταλλικά οξείδια. Ταχεία ροή του τηγμένου μετάλλου μπορεί να διαβρώσει το καλούπι και να προκαλέσει απώλεια σχήματος ή αλλοίωση στη λεπτομέρεια της κοιλότητας του καλουπιού. Ψυχρά σημεία επίσης είναι αποτέλεσμα της τυρβώδους ροής. Οι σταγόνες τηγμένου μετάλλου που εκσφενδονίζονται στο καλούπι ψύχονται και εγκλωβίζονται ως σφαιρίδια που δεν εντάσσονται απόλυτα στο μέταλλο, το οποίο ψύχεται σε μεταγενέστερη φάση. Τα σφαιρίδια αυτά συνδέονται μεταξύ τους με μηχανικούς δεσμούς.

ii. ***Ρυθμός έγχυσης***: Ο ρυθμός έγχυσης για την πλήρωση του καλουπιού είναι σημαντική παράμετρος. Εάν το τηγμένο μέταλλο εισέλθει στην κοιλότητα του καλουπιού καθυστερημένα, μπορεί να ψυχθεί προτού γεμίσει το καλούπι. Λεπτές στρώσεις μετάλλου που ψύχονται ταχύτατα από την επαφή τους με τα τοιχώματα του καλουπιού μπορεί να στερεοποιηθούν προτού το λιωμένο μέταλλο απλωθεί σε όλο το καλούπι ή ακόμα μπορεί και να συναντήσουν τηγμένο μέταλλο που έρχεται από διαφορετική κατεύθυνση και να σχηματίσουν ένα ελάττωμα το όποιο είναι γνωστό ως cold shut. Ακόμα κι αν το καλούπι έχει πληρωθεί από το τηγμένο μέταλλο , τα cold shuts δείχνουν τις ρωγμές στην επιφάνεια του χυτού με αποτέλεσμα το πλίνθωμα να μην είναι συμπαγές και να κινδυνεύει από θραύση. [19]

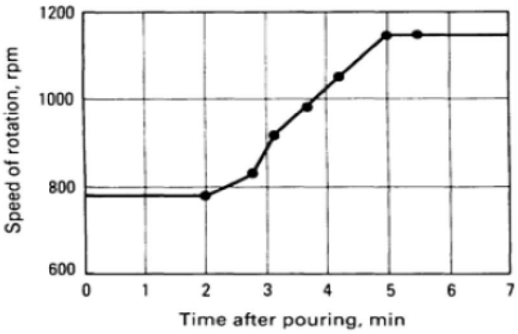
Επιπλέον, εάν ο ρυθμός έγχυσης είναι πολύ μεγάλος θα προκαλέσει διάβρωση στα τοιχώματα του καλουπιού με αποτέλεσμα να παρουσιασθούν ρωγμές και μπορεί και να λυγίσει.

Η έγχυση του μετάλλου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από το ένα άκρο του καλουπιού, είτε και από τα δυο ή ακόμα και από ειδικά σχεδιασμένο σύστημα αγωγών.

Επιπλέον σημαντικός είναι και ο βαθμός υπερθέρμανσης του μετάλλου πριν την έγχυσή του, αφού καθορίζει την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού, το ρυθμό στερεοποίησης και το ποσοστό διαφορισμού που θα λάβει χώρα. Σημαντική παράμετρος είναι η ταχύτητα περιστροφής ώστε να παράγεται δύναμη 75-120 g, και χωρίζεται σε τρία στάδια ανάλογα με την πορεία της χύτευσης:

- *Κατά τη διάρκεια της έγχυσης: Το καλούπι περιστρέφεται με τέτοια ταχύτητα που να επιτρέπεται στο τηγμένο μέταλλο να φτάνει στα τοιχώματα του καλουπιού.*
- *Κατά το τέλος της έγχυσης: Όπου η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται ομαλά*
- *Μετά το τέλος της έγχυσης: Η ταχύτητα διατηρείται σταθερή και εξαρτάται από το υλικό του καλουπιού, του μετάλλου και του απαιτούμενου πάχους.*

Η ιδανική ταχύτητα περιστροφής είναι καθοριστική για την σωστή εφαρμογή του χυτού στο καλούπι, με τις λιγότερες δυνατές δονήσεις και την απόκτηση ομοιόμορφης σύστασης.



Σχήμα 1.12: Διάγραμμα της ταχύτητας περιστροφής του καλουπιού, συναρτήσει του χρόνου μετά την απόχυση του τήγματος.

Καθώς εισέρχεται το τήγμα στο καλούπι δημιουργείται βαθμιαία πτώση της πίεσης προς τα εσωτερικά στρώματα, εξαιτίας της φυγόκεντρης επιτάχυνσης, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση μικροακαθαρσιών και μη μεταλλικών εγκλεισμάτων. Χαμηλές ταχύτητες περιστροφής προκαλούν παλινδρόμηση και φτωχές επιφανειακές ιδιότητες του πλινθώματος, ενώ πολύ υψηλές οδηγούν σε έντονο διαφορισμό με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών. Στην οριζόντια φυγοκεντρική χύτευση η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μόνο από το εξωτερικό τοίχωμα του καλουπιού που ψύχεται από το νερό. Η στερεοποίηση ξεκινά από τα εξωτερικά στρώματα συνεχίζοντας προς το εσωτερικό του χυτού και επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- *Το υλικό του τύπου, την αρχική του θερμοκρασία και το πάχος του*
- *Από τα επιχρίσματα του καλουπιού*

- *Την υπερθέρμανση, το ρυθμό απόχυσης του μετάλλου και την ταχύτητα περιστροφής*
- *Τις δονήσεις της μηχανής*

Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι το πάχος του καλουπιού και η υπερθέρμανση του τήγματος που επηρεάζουν την τοπική στερεοποίηση και την τελική μικροδομή του χυτού.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

- *Χύτευση σχεδόν όλων των κραμάτων με εξαίρεση των υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χαλύβων (>0,40-0,85% C)*
- *Μεγάλο εύρος στα χαρακτηριστικά του χυτού: είναι δυνατή η πρόσδοση συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων στο χυτό, όπως θερμική αντοχή, αντοχή στη διάβρωση, ομοιογενή σύσταση και συγκεκριμένη υφή*
- *Ευελιξία στο μέγεθος των αντικειμένων: επιτρέπεται η κατασκευή σωλήνων με μέγιστη εξωτερική διάμετρο 1,6m και πάχος μέχρι 200mm.*

Η φυγοκεντρική χύτευση απαντάται στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα για την παραγωγή σωλήνων, κυλίνδρων και την περιέλιξη πηνίων. Επίσης η πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου χρησιμοποιούν δίκτυα αγωγών που προέρχονται από τη συγκεκριμένη μέθοδο. Τέλος, προϊόντα της συναντώνται σε εκτυπωτικές μονάδες (κύλινδροι, ράουλα κτλ), σε εργοτάξια και στη χημική βιομηχανία.

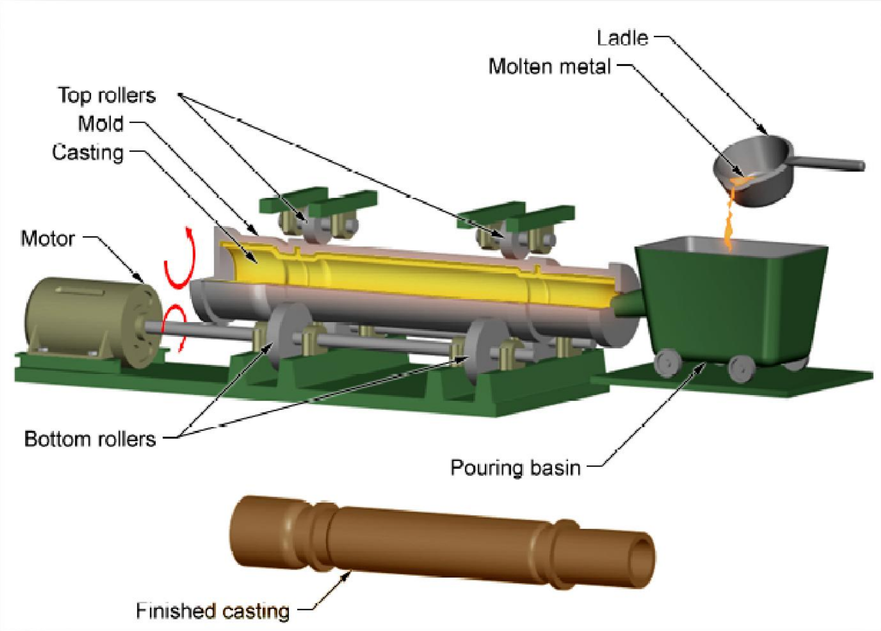
ΚΑΘΕΤΗ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

Εκτός από την οριζόντια μέθοδο, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κυλινδρικών, σφαιρικών ή σωληνοειδών αντικειμένων, υπάρχει και η κάθετη με μεγαλύτερο εύρος δυνατών γεωμετριών. Είναι δυνατή η κατασκευή πολύπλοκων τεμαχίων χωρίς να έχουν κάποιου είδους συμμετρία. Οι βασικές αρχές και σε αυτήν την περίπτωση είναι κοινές με την οριζόντια χύτευση και είναι η τεχνική που εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη οικονομία υλικού, υψηλή ποιότητα χυτού και μικρό κόστος καλουπιού. Εξαιτίας της απουσία σφαλμάτων, τα παραγόμενα χυτά είναι ισότροπα, αφού διαθέτουν τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις. Χρησιμοποιούνται καλούπια άμμου, μόνιμα ή ημι-μόνιμα και είναι δυνατή η χύτευση όλων των κραμάτων, σιδηρούχων ή μη.

Η κατηγορία της φυγόκεντρης χύτευσης διακρίνεται σε τρεις παραλλαγές:

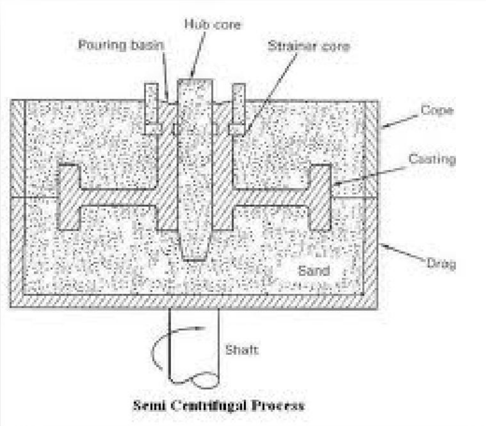
- *Πραγματική φυγόκεντρη χύτευση*
- *Ημι-φυγόκεντρη*
- *Φυγοκέντρηση*

Η *πραγματική φυγόκεντρη χύτευση* χρησιμοποιείται για την κατασκευή κυλινδρικών ή σφαιρικών αντικειμένων με περιστροφή του καλουπιού γύρω από τον άξονα του. Πραγματοποιείται κατά οριζόντιο ή κάθετο άξονα και δεν απαιτεί τη χρήση κεντρικού πυρήνα στο καλούπι. Τα παραγόμενα χυτά διακρίνονται για την απουσία σφαλμάτων και την υψηλή τους ποιότητα.



Σχήμα 1.13 : Πραγματική φυγόκεντρη χύτευση

Η *ημι-φυγόκεντρη χύτευση* πραγματοποιείται συνήθως κατά τον κατακόρυφο άξονα και προτιμάται από τις στατικές μεθόδους αφού συνδυάζει την υψηλή αντοχή και το μικρότερο κόστος. Χαρακτηριστικά αντικείμενα που παρασκευάζονται με αυτήν την τεχνική είναι: τροχαλίες, φτερωτές, τροχοί και ρότορες ηλεκτρικών κινητήρων. [18]



Σχήμα 1.14 : Ημι-φυγόκεντρη χύτευση

Η *φυγοκέντρηση* έχει το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής. Οι κοιλότητες κατανέμονται γύρω από τον άξονα του καλουπιού και έτσι επιτυγχάνεται η χύτευση πολλών αντικειμένων. Τυπικά προϊόντα της μεθόδου είναι κολάρα, μπρακέτα και ζυγοί.

Το σύστημα τροφοδοσίας στις δυο τελευταίες κατηγορίες συνδυάζει τον αγωγό εισόδου και τον αγωγό ροής του μετάλλου. Από τις μεγάλες δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφής επιτυγχάνεται καλύτερη πλήρωση του καλουπιού. Έτσι ακόμα και σε περιπτώσεις ογκωδών αντικειμένων και μικρής διαμέτρου αγωγού τροφοδοσίας, έχουμε σωστή πλήρωση του τύπου. Και εδώ συναντάμε καλούπια από πράσινη και ξηρή άμμο με ίδια φιλοσοφία επιλογής της ταχύτητας περιστροφής. Τα μόνιμα καλούπια που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από χάλυβα ή γραφίτη. Τα πρώτα προτιμώνται για την καλή επιφάνεια που παρέχουν στο χυτό αλλά χρειάζονται προσοχή όταν ψύχονται σε νερό γιατί είναι πιθανή η εμφάνιση ρωγμών. Επίσης για εύκολη εξαγωγή των πλινθωμάτων, η εσωτερική τους επιφάνεια καλύπτεται με ειδικό λιπαντικό με βάση το μολυβδαίνιο. Η στήριξη των τύπων στη μηχανή γίνεται πάνω σε τράπεζες που διαθέτουν τους κατάλληλους μηχανισμούς συγκράτησης. Τα καλούπια γραφίτη διακρίνονται για την εύκολη μορφοποίηση τους και μπορούν να κατασκευαστούν με λεπτό τοίχωμα σε σύγκριση με το πάχος του χυτού. Προσοχή δίνεται στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών χυτεύσεων, ώστε να κρυώσει επαρκώς ο τύπος σε θερμοκρασία 95-150 °C και να μην παρουσιάζονται σημάδια οξείδωσής τους. Για την αποφυγή δημιουργίας σφαλμάτων και διάβρωσης του μετάλλου, η πλήρωση του καλουπιού πραγματοποιείται σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και σε θερμοκρασία 40 °C μεγαλύτερη από την ανάλογη σε περίπτωση στατικής μεθόδου χύτευσης. Προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε στις εξωτερικές στοιβάδες του αντικειμένου, η φυγόκεντρος δύναμη να μην ξεπεράσει τα 200g για λόγους ασφαλείας. Για την απουσία διακενώσεων και ψυχρών εγκλεισμάτων, ο αρχικός ρυθμός έγχυσης είναι αρκετά υψηλός και κυμαίνεται περίπου στα 9 kg/s για χυτά μικρότερα των 45 kg , στα 23 kg/s για χυτά μεγαλύτερα από 450 kg και 45-90 kg/s για χυτά άνω των 500 kg. Κατά την τροφοδοσία σε κατακόρυφη φυγοκέντριση πρέπει να δοθεί έμφαση ώστε να περιοριστεί η τυρβώδης ροή του μετάλλου που καταστρέφει το τελικό αντικείμενο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό των αγωγών τροφοδοσίας και με τη χρήση ειδικών χοανών που κατευθύνουν το τήγμα ανάλογα με τη φορά περιστροφής. Σε αντίθεση με την πραγματική φυγόκεντρο διαδικασία, η φυγοκέντριση δεν παρουσιάζει σημαντικά φαινόμενα διαφορισμού, που εμφανίζονται μόνο σε λεπτότοιχα τεμάχια (< 75 mm). Οι αιτίες που τον προκαλούν είναι οι ακόλουθες:

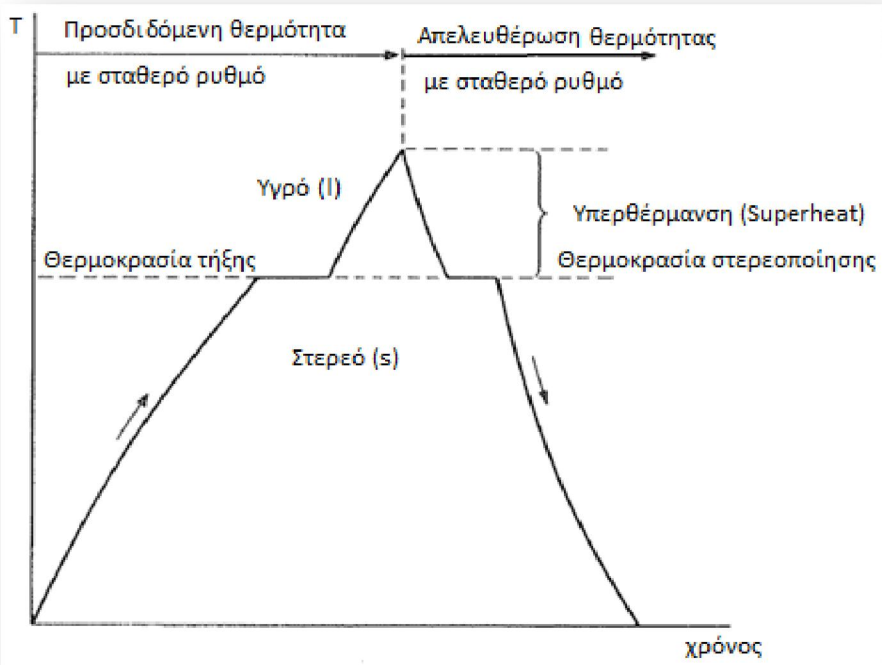
- *Οι δονήσεις που κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης επιτρέπουν την ύπαρξη υγρής ζώνης ανάμεσα σε σχηματισμένους κρυστάλλους. Οφείλεται δηλαδή στη διακοπή της διαδικασίας πυρηνοποίησης από τις δονήσεις.*
- *Η ανομοιομορφία στη ροή του ρευστού μετάλλου, που επιτρέπει την επικάθηση ρευστού μετάλλου πάνω σε ήδη στερεοποιημένο σημείο.*
- *Από τη διαφορά των βαρυτικών δυνάμεων μεταξύ άνω και κάτω τμήματος του καλουπιού.*

Ο περιορισμός των δονήσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη σωστή στήριξη και το ζύγισμα του καλουπιού, καθώς και με τον έλεγχο των εξαρτημάτων της μηχανής.

ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

Η διαδικασία της χύτευσης συνεπάγεται αλλαγή στην κατάσταση του υλικού από την υγρή φάση στη στερεή, ενώ παράλληλα διατηρείται το σχήμα μετάλλου που έχει δημιουργηθεί κατά την αλλαγή της φάσης. Τα προβλήματα που συνδέονται με αυτή τη διαδικασία είναι κυρίως αυτά που συνδέονται με τις αλλαγές της φυσικής κατάστασης και των ιδιοτήτων του υλικού, καθώς επηρεάζονται από διακυμάνσεις στη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, η λύση σε πολλά προβλήματα χύτευσης μπορεί να επιτευχθεί μόνο με καλή κατανόηση της διαδικασίας της στερεοποίησης και της επίδρασης της θερμοκρασίας στα υλικά.

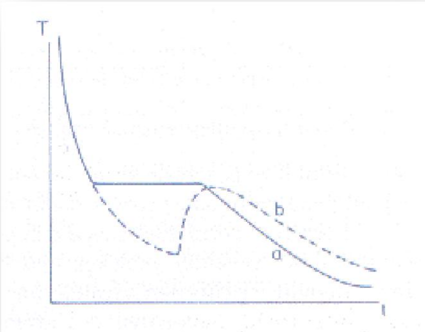
Κατά την τήξη, η ενέργεια που προστίθεται υπό μορφή θερμότητας σε ένα μέταλλο, μεταβάλλει το σύστημα δυνάμεων που κρατάει τα άτομα κοντά το ένα στο άλλο. Καθώς προστίθεται επιπλέον θερμότητα, οι δεσμοί που ενώνουν τα άτομα, σπάνε, και τα άτομα είναι ελεύθερα να κινούνται όπως και αυτά των υγρών. Κατά τη στερεοποίηση ενός μετάλλου, συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία. Και οι δύο διαδικασίες εμφαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.15. Διαδικασία τήξης και πήξης καθαρού μετάλλου

Η θερμότητα που απελευθερώνεται από το τηγμένο μέταλλο διαχέεται αρχικά στο καλούπι και εν συνεχεία στο περιβάλλον. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, τα άτομα κινούνται όλο και λιγότερο και τελικά καταλαμβάνουν τη θέση τους μαζί με άλλα άτομα στον γειτονικό χώρο, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένα κρυσταλλικό πλέγμα.

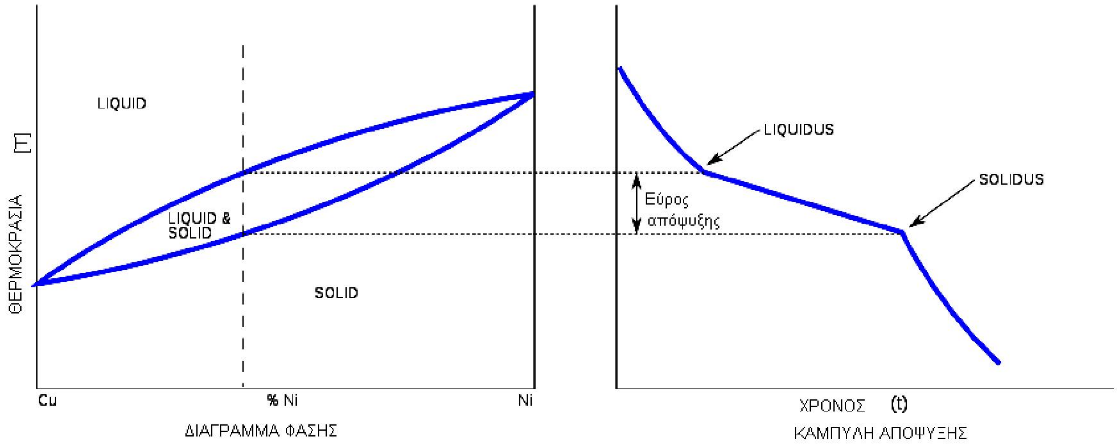
Η έναρξη της στερεοποίησης ή πήξης ενός καθαρού μετάλλου συμβαίνει συχνά με κάποια καθυστέρηση. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **υπόψηξη** ή **υπέρτηξη** και συμβαίνει όταν στη θερμοκρασία τήξης οι σχηματιζόμενοι πυρήνες βρίσκονται σε μετασταθή κατάσταση. Μόνο σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες της T_m οι πυρήνες αυτοί αποκτούν την απαιτούμενη σταθερότητα για την έναρξη της στερεοποίησης. Το παρακάτω σχήμα δείχνει αυτό ακριβώς το φαινόμενο.



Σχήμα 1.16 : Υπόψυξη ή υπέρτηξη κατα τη στερεοποιηση καθαρου μεταλλου

Αυτό συμβαίνει διότι εάν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη της T_m , οι μικρές ομάδες ατόμων που ενώνονται από καιρού εις καιρό, και σχηματίζουν εμβρυακούς κρυστάλλους, διαλύονται ξανά στη μάζα του τηγμένου υγρού μετάλλου. Μόνο εάν η θερμοκρασία γίνει μικρότερη της T_m ο εμβρυακός κρύσταλλος θα βρίσκεται σε σταθερότερη θερμοδυναμικά κατάσταση και θα σχηματίσει ένα κρυσταλλικό πυρήνα.(**πυρηνοποίηση**)[13]

Η καμπύλη απόψυξης ενός κράματος διαφέρει αυτής ενός καθαρού μετάλλου στο ότι η στερεοποίηση δε γίνεται σε συγκεκριμένο σημείο αλλά σε ένα «θερμοκρασιακό εύρος απόψυξης». Το παρακάτω σχήμα δείχνει την καμπύλη απόψυξης (δεξιά) ενός διμερούς συστήματος που αναμιγνύεται σε όλες τις φάσεις και σε όλες τις αναλογίες (αριστερά).



Σχήμα 1.17 : Καμπύλη απόψυξης ενός διμερούς συστήματος που αναμιγνύεται σε όλες τις φάσεις και σε όλες τις αναλογίες

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΤΩΜΕΝΕΣ ΔΟΜΕΣ

Αφού σχηματιστούν οι πρώτοι πυρήνες κρυστάλλωσης, η ανάπτυξη τους αρχίζει με τη στερεοποίηση του υλικού. Οι αποκτούμενες δομές κατά τη στερεοποίηση εξαρτώνται από τον τρόπο κατά τον οποίο η ειδική θερμότητα και η λανθάνουσα θερμότητα απομακρύνονται από το σύστημα στερεού/υγρού.

Η **ειδική θερμότητα** απομακρύνεται είτε με ακτινοβολία προς το περιβάλλον είτε με αγωγή προς τη μήτρα χύτευσης (τύπο, καλούπι), εώς ότου το υγρό ψυχθεί στη θερμοκρασία στερεοποίησης του.

Η **λανθάνουσα θερμότητα**, - η αποθηκευμένη, δηλαδή, ενέργεια που ελευθερώνεται προκειμένου το «εν δομική αταξία» υγρό να μετασχηματισθεί σε στερεό με δομική κρυσταλλική τάξη, απομακρύνεται από τη διεπιφάνεια στερεού – υγρού πριν περατωθεί η στερεοποίηση.

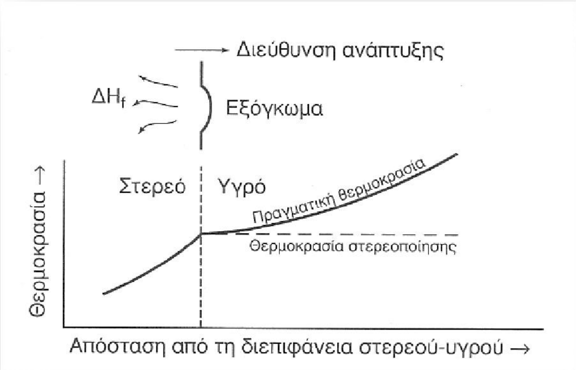
Ο τρόπος με τον οποίο απομακρύνεται η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, προσδιορίζει το μηχανισμό της ανάπτυξης και της τελικής δομής. [13]

ΕΠΙΠΕΔΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Το είδος αυτό της ανάπτυξης εμφανίζεται κατά τη στερεοποίηση καθαρών μετάλλων, όταν το μέταλλο ψύχεται αργά (συνθήκες ισορροπίας). Η θερμοκρασία του τήγματος είναι υψηλότερη της θερμοκρασίας στερεοποίησης, ενώ η θερμοκρασία του στερεού είναι μικρότερη της θερμοκρασίας στερεοποίησης.

Κατά τη βραδεία απόψυξη του υγρού μετάλλου, η στερεοποίηση περνά, κατά προσέγγιση, από διαδοχικά στάδια ισορροπίας. Δεν υπάρχουν εκτεταμένες περιοχές σε κατάσταση υπέρτηξης, ενώ η στερεοποίηση πραγματοποιείται αποκλειστικά και μόνο πάνω στη διεπιφάνεια στερεού – υγρού. Πρόκειται για μια ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια, με ταχύτητα μετακίνησης που εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα απαγωγής της θερμότητας, διαμέσου των τοιχωμάτων της μήτρας και του ήδη στερεοποιημένου μετάλλου.[17]

Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης απομακρύνεται με αγωγή από τη διεπιφάνεια στερεού – υγρού, διαμέσου του στερεού προς τη γειτονική περιβάλλουσα περιοχή (τύπος χύτευσης), ώστε να συνεχισθεί η στερεοποίηση. Οποιαδήποτε μικρή ανωμαλία ή εξόγκωμα που αρχίζει να αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια περιβάλλεται από υγρό μέταλλο, το οποίο έχει θερμοκρασία υψηλότερη εκείνης της στερεοποίησης. Η ανάπτυξη του εξογκώματος τότε σταματά, μέχρις ότου και η υπόλοιπη διεπιφάνεια προσεγγίσει το ίδιο επίπεδο. (σχήμα 2.4).

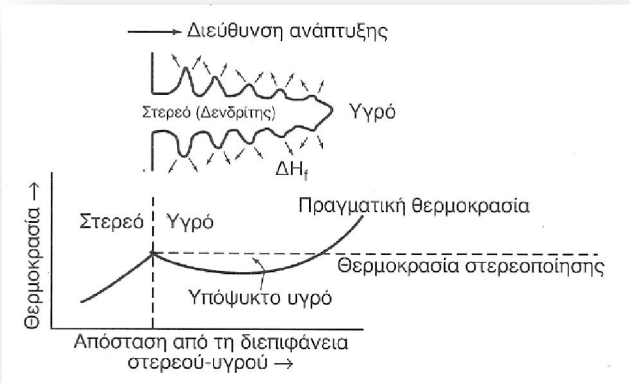


Σχήμα 1.18 : Όταν η θερμοκρασία του υγρού μετάλλου είναι υψηλότερη της θερμοκρασίας στερεοποίησης, οποιοδήποτε αναπτυσσόμενο εξόγκωμα ή ανωμαλία στη διεπιφάνεια στερεού – υγρού οδηγεί σε επίπεδη ανάπτυξη.

Η ταχύτητα ανάπτυξης των διαφορετικών κρυστάλλων του στερεού δεν εξαρτάται από την κρυσταλλογραφική διεύθυνση τους ως προς τη βαθμίδα της θερμοκρασίας, ενώ κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, η επιφάνεια του στερεού παρουσιάζει την όψη μωσαϊκού.

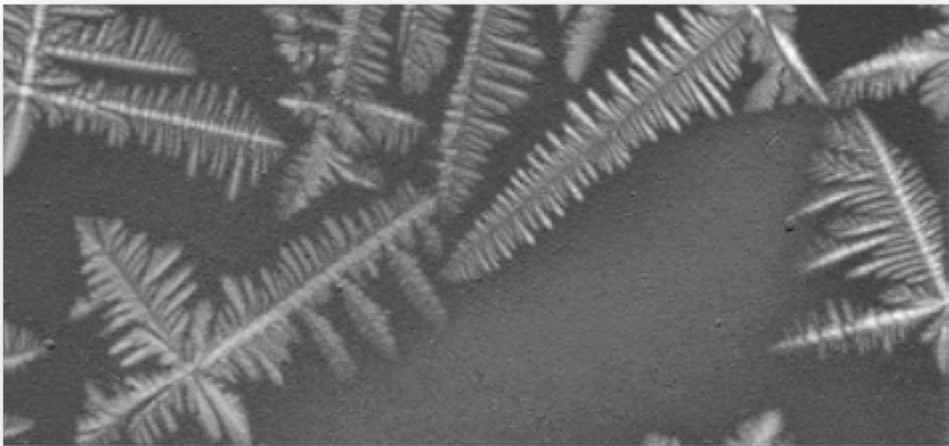
ΔΕΝΔΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Δενδριτική ανάπτυξη παρατηρείται όταν οι δημιουργούμενοι πυρήνες κρυστάλλωσης είναι ολιγάριθμοι. Τότε, το υγρό μέταλλο υποψύχεται, πριν τη στερεοποίηση (σχήμα 2.5).



Σχήμα 1.19 : Όταν το υγρό μέταλλο υποψύχεται, ένα εξόγκωμα στη διεπιφάνεια στερεού υγρού αναπτύσσεται σύντομα, ως δενδρίτης. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης απομακρύνεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία του υποψυχόμενου υγρού μέχρι τη θερμοκρασία στερεοποίησης.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ευνοείται η ανάπτυξη ενός μικρού εξογκώματος, το οποίο καλείται **δενδρίτης**. Κατά την ανάπτυξη του δενδρίτη, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης απάγεται προς το υποψυχόμενο υγρό, ανυψώνοντας έτσι τη θερμοκρασία του, η οποία τείνει προς την τιμή της θερμοκρασίας στερεοποίησης. Στον αρχικό δενδριτικό κορμό αναπτύσσονται δευτερογενείς και τριτογενείς κλάδοι και με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται η ταχύτητα απαγωγής της λανθάνουσας θερμότητας. [17]



Σχήμα 1.20 : Δενδρίτες

Στα καθαρά μέταλλα η δενδριτική ανάπτυξη αποτελεί, συνήθως, ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ανάπτυξης. Το ποσοστό αυτό δίνεται από τη σχέση :

$$f = \frac{c \cdot \Delta T}{\Delta H_f}$$

όπου

$c \rightarrow$ η ειδική θερμότητα υγρού,

$\Delta T \rightarrow$ η υπόψυξη

$\Delta H_f \rightarrow$ η λανθάνουσα θερμότητα που αποδίδεται κατά τη στερεοποίηση

$c \cdot \Delta T \rightarrow$ η θερμότητα την οποία είναι δυνατό να απορροφήσει το υποψυχόμενο υγρό

Γίνεται φανερό ότι όσο η υπόψυξη ΔΤ αυξάνεται, τόσο περισσότερο εντείνεται η δενδριτική ανάπτυξη.

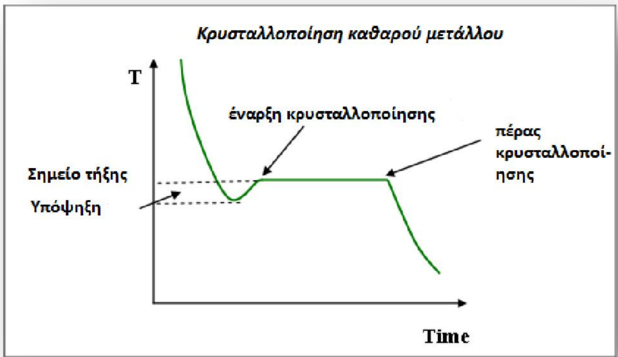
Γενικά στην επίπεδη ανάπτυξη, το καλούπι χύευσης πρέπει να απορροφήσει τη λανθάνουσα θερμότητα, ενώ στη δενδριτική ανάπτυξη η λανθάνουσα θερμότητα τήξης απορροφάται από το υποψυχόμενο υγρό.

ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗΣ Η ΚΥΤΤΑΡΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Ένας τρίτος μηχανισμός στερεοποίησης είναι η **κυψελοειδής ή κυτταρική ανάπτυξη.** Συναντάται στην περίπτωση κατά την οποία η υγρή ζώνη που βρίσκεται σε κατάσταση υπέρτηξης ή υπόψυξης μπροστά από τη διεπιφάνεια στερεού – υγρού, έχει μικρό πλάτος, ώστε να μην καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη δενδριτών. Στην περίπτωση αυτή, η ανάπτυξη έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7. Κάθε κρύσταλλος υποδιαιρείται σε κυψέλες, επιμήκεις κατά τη διεύθυνση του ρυθμού μεταβολής της ποσότητας $\frac{\partial T}{\partial x}$, εμφανίζοντας έτσι και κυψελοειδή μικροδιαφορισμό.[17]

Σχήμα 1.21. Κυψελοειδής ή κυτταρική ανάπτυξη

Πρώτη φάση - Η ανάπτυξη των κρυστάλλων ξεκινά από την επιφάνεια: Η ζώνη στερεοποίησης προχωρά, συναρτήσει του χρόνου από την εξωτερική επιφάνεια, η οποία βρίσκεται σε επαφή με τα τοιχώματα του τύπου χύτευσης, προς το εσωτερικό του τήγματος απόχυσης. Η απόψυξη πραγματοποείται με ροή θερμότητας διαμέσου του ήδη στερεοποιημένου τήγματος, προς τα εσωτερικά τοιχώματα του τύπου, και διαμέσου των τοιχωμάτων του, προς το περιβάλλον. Το μέρος του υλικού που θα φτάσει αρχικά σε θερμοκρασία πήξης θα είναι η εξωτερική επιφάνεια του υγρού μετάλλου, λόγω της απότομης ψύξης με τα, συγκριτικά, ψυχρότερα τοιχώματα του καλουπιού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ταυτόχρονα ένας μεγάλος αριθμός στοιχειωδών κυττάρων (unit cells), γύρω από την διεπιφάνεια επαφής. Κάθε στοιχειώδες κύτταρο αποτελεί έναν πυρήνα για το σχηματισμό και την ανάπτυξη ενός *κρυστάλλου* , και καθώς τα υπόλοιπα άτομα ψύχονται, τείνουν να καταλάβουν κατάλληλη θέση στο κρυσταλλικό πλέγμα. [12]

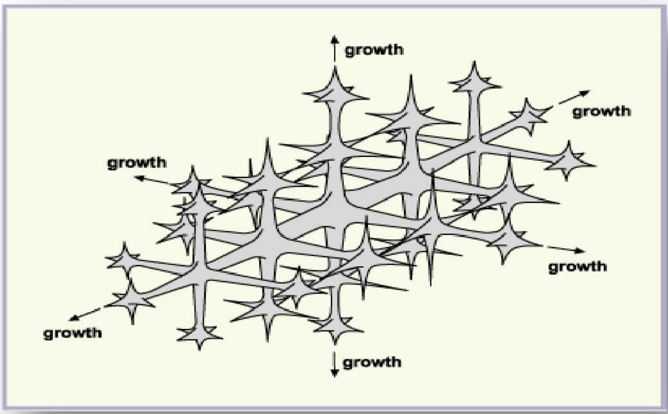


Σχήμα 1.22 : Δημιουργία πυρήνων και έναρξη κρυσταλλοποίησης

Λόγω της υψηλής υπόψυξης οι σχηματιζόμενοι πηρύνες κρυστάλλωσης είναι πολυπληθείς, με αποτέλεσμα η ανάπτυξη των κόκκων να είναι ανταγωνιστική και, κατά συνέπεια, να περιορίζεται γρήγορα. Οι πρώτοι κρύσταλλοι που σχηματίζονται στο εξωτερικό στρώμα του στερεοποιημένου μετάλλου είναι ισοαξονικοί, μικρού μεγέθους και τυχαίου προσανατολισμού **(μικροκρυσταλλική ζώνη)**. Ο σχηματισμός πυρήνων κρυστάλλωσης επηρεάζεται, κύρια, από τη θερμοκρασία του τήγματος και τις θερμικές ιδιότητες του υλικού του καλουπιού, παράγοντες που, κατ'επέκταση , επηρεάζουν την έκταση της μικροκρυσταλλικής ζώνης.

Δεύτερη φάση (βασαλτική ζώνη) : Μετά το σχηματισμό του επιφανειακού στερεού στρώματος η ανάπτυξη των κόκκων γίνεται πιο ομαλά δεδομένου ότι το πάχος του στερεοποιημένου τμήματος και η μάζα του, είναι ικανά, ώστε να προκαλέσουν μια σημαντική μείωση στο χρόνο απόψυξης μεταξύ του εξωρερικού περιβλήματος και του εσωτερικού μετάλλου. Οι πυρήνες θα συνεχίσουν να σχηματίζονται γύρω από την εξωτερική επιφάνεια του υγρού μετάλλου, καθώς η θερμοκρασία μειώνεται. Παρόλα αυτά ο ρυθμός μείωσης της, συνεχίζει να ελαττώνεται. Η θερμική ροή κινείται πλέον και διαμέσου του ήδη σχηματισμένου στερεού μετάλλου με αποτέλεσμα να βρίσκει μεγαλύτερη αντίσταση. Η επιφάνεια του καλουπιού έχει ήδη θερμανθεί και έχει μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας συγκριτικά με το τηγμένο μέταλλο. Το καλούπι μπορεί να έχει ξηρανθεί σε τέτοιο βαθμό που να λειτουργεί ως μόνωση γύρω από το χυτό.

Η επιλεκτική ανάπτυξη των κρυστάλλων σε μια διέυθυνση κάθετη προς τη θερμή ζώνη (hot zone) είναι σημαντικά μεγαλύτερη , από την ανάπτυξη κρυστάλλων σε άλλες διευθύνσεις. Έτσι, οι κρύσταλλοι αναπτύσσονται σε στήλες ως προς το κέντρο των βαρέων τμημάτων του χυτού. Με τη κλίση της θερμοκρασίας να είναι σχετικά μικρή, η ανάπτυξη των κρυστάλλων μπορεί να συμβεί πλευρικά των στηλών αυτών δημιουργώντας δομές που ονομάζονται **δενδρίτες** . Αυτή η πρώτη δενδροειδούς σχήματος στερεοποίηση εγλωβίζει μικρούς θύλακες τηγμένου μετάλλου οι οποίοι με τη σειρά τους θα ψυχθούν αργότερα. Αποδεικτικά στοιχεία για την ανάπτυξη κρυστάλλων αυτού του είδους είναι δύσκολο να συναντήσει κανείς στη χύτευση καθαρών μετάλλων, στη χύτευση κραμάτων όμως εμφανίζονται αρκετά συχνά.



Σχήμα 1.23. Δενδριτικη αναπτυξη κρυσταλλων

Τρίτη φάση: Καθώς το πάχος της επιφάνειας του στερεοποιημένου μετάλλου αυξάνεται ο ρυθμός απόψυξης του εναπομείναντος υγρού μετάλλου μειώνεται ακόμα περισσότερο και η θερμοκρασία του υλικού τείνει να εξισσοροπηθεί. Σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας και αργή ψύξη επιτρέπουν πυρήνωση σε τυχαίες διευθύνσεις, καθώς οι διεπιφάνειες στερεού-υγρού πλησιάζουν η μια την άλλη σε λιγότερα σημεία από ότι συμ-βαίνει με ταχεία ψύξη και οι κόκκοι αναπτύσσονται λιγότερο και σε μεγαλύτερα μεγέθη **(ισοαξονική ζώνη**). Στην περιοχή αυτή η στερεοποίηση γίνεται με πολύ αργούς ρυθμούς, που οφείλονται σε δύο κύριους λόγους: α) τη μεγάλη απόσταση από τα τοιχώματα του καλουπιού και β) τη συστολή του ήδη στερεοποιημένου τήγματος, που μπορεί να δημιουρ-γήσει διάκενο μεταξύ του στερεοποιούμενου τμήματος του χυτού και των τοιχωμάτων του τύπου.

ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ ΕΚ ΣΥΣΤΟΛΗΣ (SHRINKAGE)

Η διαδικασία της χύτευσης συνοδεύεται από ελάττωση του ειδικού όγκου του υπό στερεοποίηση μετάλλου ή κράματος. Μερικά από τα πιο σημαντικά προβλήματα κατά τη παραγωγή χυτών συνδέονται άμεσα με τη διαδικασία της *υποχώρησης εκ συστολής*. Το ποσοστό της συστολής που θα πραγματοποιηθεί εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποι-ούμε και επηρεάζεται από τη διαδικασία της χύτευσης που θα ακολουθήσουμε. [06]

Συντελείται σε τρία στάδια:

1ο στάδιο: Ενώ το μέταλλο ή το κράμα βρίσκεται σε υγρή κατάσταση

2ο στάδιο: Κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου

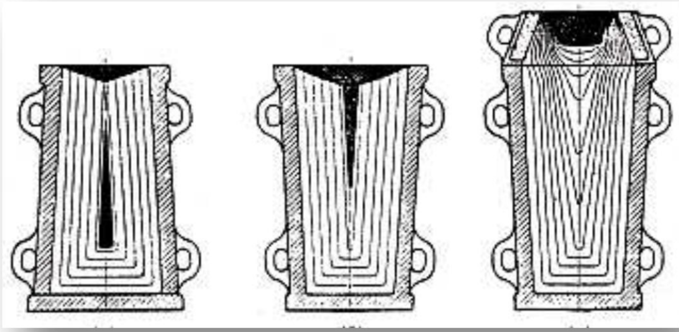
3ο στάδιο: Μετά το πέρας της στερεοποίησης

Κατά τη διαδικασία της τήξης και προτού λάβει χώρα η έγχυση, το μέταλλο θερμαίνεται πάντα σε θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του σημείου τήξης του. Η θερμότητα που προσδίδεται επιπλεόν προκειμένου να συμβεί αυτό ονομάζεται **superheat.** Η πρόσδοση αυτής θερμότητας εξασφαλίζει ότι το υγρό μέταλλο θα είναι αρκετά ρευστό ώστε να μεταφέρθει εύκολα μέσα στο καλούπι μετά την έγχυση και ότι μόλις έρθει σε επαφή με τα ψυχρότερα τοιχώματα του καλουπιού δε θα ψυχθεί απευθείας έτσι ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για να γεμίσει πλήρως το καλούπι. Απώλεια της superheat συντελεί σε συστολή και αυξημένη πυκνότητα του υλικού. Η μείωση αυτή, στον όγκο του υλικού, αντισταθμίζεται με την έγχυση πρόσθετου υλικού στην κοιλότητα του καλουπιού καθώς η superheat μειώνεται. Εξαίρεση αποτελεί η πειπτωση κατά την οποία η κοιλότητα του καλουπιού είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε μέρος της να ψυθεί απότομα και να μην επιτρέπει περαιτέρω υγρό μέταλλο να εισέλθει προς αναπλήρωση του συσταλμένου υλικού.[05]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τη χύτευση μέσα σε καλούπι δεν πραγματοπιείται ταυτόχρονη στερεοποίηση του συνόλου του ρευστού μετάλλου, αλλά η στερεοποίηση γίνεται σε διαδοχικά στρώματα από τα τοιχώματα προς το κέντρο του τύπου, σε καθένα από τα οποία παρατηρείται μείωση του ειδικού όγκου του υλικού. Η στρωματική πορεία της στερεοποίησης προκαλεί, τελικά, κοίλωμα κωνικής επιφάνειας στην περιοχή του χυτού η οποία στερεοποιήθηκε τελευταία. Το κοίλωμα αυτό ονομάζεται **διακένωση.**

Κατά την «εκ των άνω» απόχυση του ρευστού στον τύπο, οι διακενώσεις δημιουργούνται κυρίως επιφανειακά. Κατά την «κατ’αντιρροή» χύτευση, η στερεοποίηση ολοκληρώνεται με την πήξη του εσωτερικού του ρευστού, κι έτσι οι διακενώσεις σχηματίζονται γύρω από άξονα του τύπου.

Η **θέση της διακένωσης** εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τη γεωμετρία του τύπου, αφού η απόψυξη γίνεται διαμέσου των τοιχωμάτων του (σχήμα 2.3).



(α) (β) (γ)

Σχήμα 1.24 : Η θέση των διακενώσεων εξαρτάται και από το σχήμα του τύπου χύτευσης, το οποίο καθορίζει τη μορφή της ζώνης πήξης.

Το **μέγεθος των διακενώσεων** εξαρτάται από τη διαφορά των ειδικών όγκων υγρού-στερεού μετάλλου, αλλά και την αρχική θερμοκρασία του ρευστού, αφού δημιουργία διακενώσεων παρατηρείται και κατά τη συστολή του ρευστού ως τη θερμοκρασία στερεοποίησης του (1ο στάδιο). [17]

Οι διακενώσεις αποτελούν περιοχές συσσώρευσης μικροακαθαρσιών του μετάλλου. Στην περίπτωση των επιφανειακών διακενώσεων, μια τέτοια συσσώρευση αποτελεί και αιτία για την έναρξη διάβρωσης του αντικειμένου, με την επιλεκτική οξείδωση των ακαθρσιών από την ατμόσφαιρα. Γι' αυτό όταν είναι αδύνατη η αποφυγή της παρουσίας διακενώσεων επιδιώκεται αυτές να μην είναι επιφανειακές.

Κατά τη χύτευση χάλυβα, οι διακενώσεις αντιμετωπίζονται με τη χρήση θερμών ή ψυχρών **ψευδοκεφαλών**, όπου συγκεντρώνονται οι διακενώσεις (*σχήμα 2.3 (γ)*)**.** Το αντίστοιχο τμήμα του πλινθώματος αποκόπτεται τελικά με μηχανικό τρόπο. Άλλος τρόπος αντιμετώπισης των διακενώσεων είναι η χρήση **προσεπιχωνευμάτων** και **οχετών έγχυσης** για χυτά μεγάλων διαστάσεων οι οποίοι επιτρέπουν την τροφοδοσία με ρευστό μέταλλο της συνεχώς υποχωρούσας λόγω συστολής μάζας του υγρού. Με αυτό τον τρόπο η σχηματιζόμενη διακένωση σχηματίζεται σε τμήματα του χυτού που δεν ανήκουν στην τελική του γεωμετρία και τα οποία αποκόπτονται στη συνέχεια με μηχανική μέθοδο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, στη θέση του ογκώδους τμήματος του χυτού τοποθετούνται **ψύχοντα σώματα,** τόσο εντός του αποτυπώματος, όσο και επί της εσωτερικής του επιφάνειας. Η παρουσία των σωμάτων αυτών υποβοηθά την ταχύτερη πήξη του ογκώδους τμήματος και έτσι επιταχύνεται η συνολική στερεοποίηση.

Στην περίπτωση της απόχυσης ψευδαργύρου σε λεπτή πλάκα, εκτός από την τοποθέτηση ψυχόντων σωμάτων, η πήξη υποβοηθάται από ψύξη κατά στρώματα, με ρεύμα αέρα, στο κάτω μέρος της πλάκας.

Η μη επιφανειακές διακενώσεις εντοπίζονται με μη καταστροφικούς ελέγχους όπως είναι οι ακτίνες Χ, οι ακτίνες γ, οι υπέρηχοι. Κλπ.

Σε αντίθεση με τις διακενώσεις, η ύπαρξη **μικροδιακενώσεων** στη μάζα του χυτού, δεν αποτελεί σοβαρό ελάττωμα του μετάλλου. Με τον όρο μικροδιακενώσεις χαρακτηρίζονται τα μικρά κενά μεταξύ των στερεοποιημένων κόκκων και στα όρια τους. Η δημιουργία τους αποδίδεται στην ύπαρξη μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους, που οδηγεί σε ζώνη πήξης μεγάλου πάχους, η οποία όπως αναφέρθηκε χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη δενδριτικών κρυστάλλων. Μεταξύ αυτών εγκλωβίζεται υγρή φάση η οποία κατά τη στερεοποίηση της συστέλλεται,αφήνοντας πολλά διάκενα, ορατά σε οπτικό μικροσκόπιο. Στο εσωτερικό των μικροδιακενώσεων δεν εγκλωβίζεται αέρας, ο οποίος θα μπορούσε να προκαλέσει την οξείδωση του μετάλλου, ενώ, κατά το στάδιο της μηχανικής κατεργασίας που ακολουθεί (έλαση), συνήθως πραγματοποείται συνένωση και τελική εξάλειψή τους.

Μετά το πέρας της στερεοποίησης του ρευστού, το πλίνθωμα συστέλλεται σε στερεά κατάσταση. Η συστολή εξαρτάται από το συντελεστή συστολής σε στερεά κατάσταση, η τιμή του οποίου είναι διαφορετική για τα διάφορα μέταλλα και κράματα. Αμέσως μετά το πέρας της πλήρους πήξης, στη μάζα του χυτού επικρατεί ανισοθερμία, - οι εξωτερικές ζώνες στερεοποίησης είναι ψυχρότερες από τις εσωτερικές, - και η συστολή δεν πραγματοποείται με τρόπο ομοιόμορφο. Έτσι αναπτύσσονται εσωτερικές μηχανικές τάσεις που δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως αποθηκευμένη ελαστική δυναμική ενέργεια.

Οι μηχανικές τάσεις εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του χυτού, εξαιτίας της αυξημένης ανισοθερμίας κατά την απόψυξη. Οι εσωτερικές τάσεις μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση του χυτού, ρωγμάτωση ή και θραύση του, αμέσως μετά την πλήρη στερεοποίηση του και πριν την τέλεια απόψυξη του όταν το μέταλλο εμφανίζει, ακόμα, μειωμένη μηχανική αντοχή λόγω υψηλών θερμοκρασιών, ενώ οι μηχανικές τάσεις έχουν αρχίσει, ήδη, να αναπτύσσονται. Η ρωγμάτωση και η θραύση ευννοούνται επίσης και από την κακή σχεδίαση του αντικειμένου.

ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΣ

Διαφορισμός καλείται το φαινόμενο της ανομοιογενούς κατανομής του διαλυόμενου στοιχείου από το κέντρο προς τη περιφερεια του σχηματιζόμενου κόκκου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης σε ένα ρευστό μεταλλικό κράμα. Ανάλογα με την έκταση στην οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο ο διαφορισμός διακρίνεται σε **μακροδιαφορισμό** και **μικροδιαφορισμό.**

ΜΑΚΡΟΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΣ

Είναι η χημική ανομοιογενεια σε όλη την έκταση ενός μεταλλικού πλινθώματος χύτευσης (χελώνας) που δεν είναι δυνατό να εξαλειφθεί με ανόπτηση. Το φαινόμενο οφείλεται στη μη σύγχρονη στερεοποίηση του συνόλου του τήγματος, κατά τη διάρκεια της οποίας το υγρό μέταλλο εμπλουτίζεται συνεχώς σε ακαθαρσίες, ώστε το τμήμα που στερεοποείται τελευταίο να είναι πλουσότερο σε ακαθαρσίες που συχνά αναφέρονται με τον όρο **σύνδρομα** ή **συνοδά στοιχεία.**[17]

Έτσι οι ιδιότητες μετάλλων και κραμάτων χύτευσης είναι δυνατόν να διαφέρουν σημαντικά από το κέντρο προς τη περιφερεια. Όταν η μάζα του μετάλλου που στερεοποιείται είναι αρκετα μεγάλη και η απόψυξη πραγματοποείται με νραδύ ρυθμό, ο διαφορισμός των ακαθαρσιών παράγεται όχι μόνο σε μικρο-κλίμακα (κρλυσταλλος) αλλά και σε μακροκλίμακα (χυτό). Οι ακαθαρσίες, εκεινες, κυρίως που σχηματίζουν με το μεταλλο βάσης, φάσεις χαμηλού σημείου τήξης έχουν την τάση να μεταναστεύουν προς τις περιοχές όπου η στερεοποίηση πραγματοποείται τελευταία , προς το κέντρο δηλαδή του χυτού.

Ο μακροδιαφορισμός επηρεάζει κατά σοβαρό τρόπο την ομοιογένεια του στερεοποιηθέντος κράματος. Συνήθως συνοδεύεται και από συσσώρευση αερίων εγκλωβισμένων στο εσωτερικό του μετάλλου, δεδομένου ότι αυτά είναι περισσότερο ευδιάλυτα στην υγρή απ’ότι στη στερεά φάση, γεγονός που ευνοεί το σχηματισμό θυλάκων αερίων οι οποίοι καθιστούν συχνά το σχηματιζόμενο στερεό εύθραυστο.

Το φαινόμενο του μακροδιαφορισμού μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε για τον καθαρισμό προϊόντων χύτευσης από σύνδρομα στοιχεία , τα οποία, όπως π΄.χ το θείο και ο φώσφορος, καθιστούν το χυτό εύθραυστο. Κατά τον καθαρισμό, το χυτό θερμαίνεται βαθμιαία με αποτέλεσμα τη συσσώρευση των ακαθαρσιών σε μια περιοχή μικρής έκτασης η οποία μπορεί να απορριφθεί με μηχανικό τρόπο.

Μακροδιαφορισμός παρατηρείται επίσης, και κατά τη στερεοποίηση μετάλλου ή κράματος, το ειδικό βάρος του οποίου σε στερεά κατάσταση έχει σημαντική διαφορά από αυτό σε υγρή με αποτέλεσμα το διαφορισμό λόγω βαρύτητας. [17]

ΜΙΚΡΟΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΣ

Είναι η χημική ανομοιογένεια σε κλίμακα κόκκου (δενδριτών). Οφείλεται στη ταχεία στερεοποίηση του κράματος και εντοπίζεται συνήθως στα τμήματα του πλινθώματος τα οποία στερεοποιούνται ταχύτατα. Κατά το μικροδιαφορισμό εμφανίζονται φάσεις που δεν προβλέπονται από τα αντίστοιχα διαγράμματα ισορροπίας φάσεων.

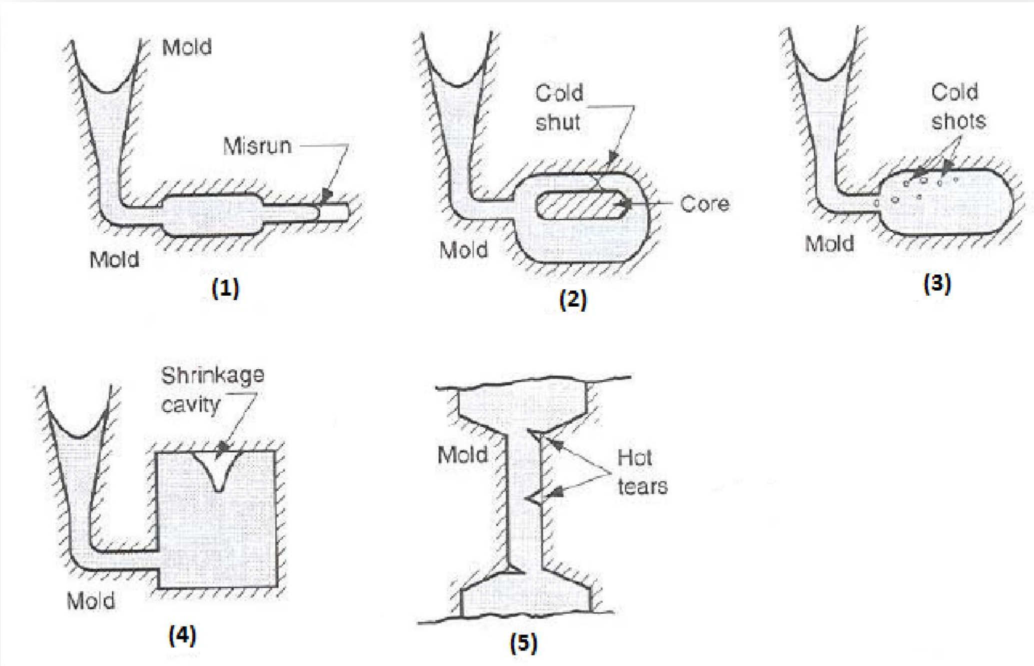
Κατά τη στερεοποίηση του τήγματος στον τύπο οι σχηματιζόμενοι, λόγω του μικροδιαφορισμού δενδρίτες εμφανίζουν διαφορετική χημική σύσταση στο κέντρο τους από αυτήν των εξωτερικών τους περιοχών. Το υγρό που στερεοποιείται τελευταίο είναι πλουσιότερο σε κραματικά στοιχεία από τις ζώνες που στερεοποιούνται αρχικά. Οι μικρές ποσότητες υγρού που παγιδεύονται μεταξύ των δενδριτικών κλάδων και οι οποίες δεν έχουν πλέον επαφή με τον κύριο όγκο του υπόλοιπου υγρού οδηγούν σε **ενδοδενδριτικό διαφορισμό.** Εντός του παγιδευμένου αυτού υγρού, η συγκέντρωση σε διαλυόμενο στοιχείο είναι μεγαλύτερη εκείνης του υπόλοιπου συνόλου. Το φαινόμενο του μικροδιαφορισμού προκαλεί μείωση των καλών ιδιοτήτων του κράματος και γι αυτό συνιστάται θερμική κατεργασία **ανόπτησης που οδηγεί σε ομογενοποίηση.** Πρόκειται για θέρμανση του πλινθώματος χύτευσης σε ορισμένη θερμοκρασία και για χρονικό διάστημα ικανό ώστε να επέλθει διάχυση των ατόμων σε στερεά κατάσταση και σχηματισμός ομοιογενών κρυστάλλων. Η θερμοκρασία ανόπτησης πρέπει να επιλεγεί με ακρίβεια, διότι υψηλότερη του δέοντος θερμοκρασία θα προκαλέσει επίτηξη στα όρια των κόκκων και νέο μικροδιαφορισμό στην περιοχή αυτή.[17]

ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

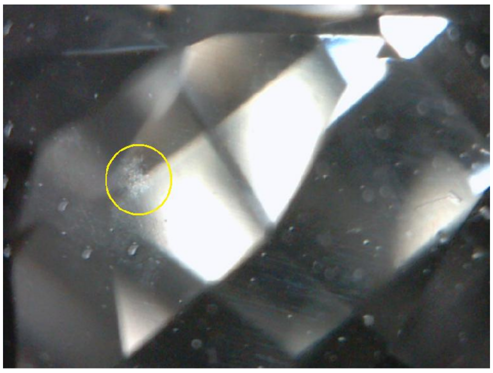
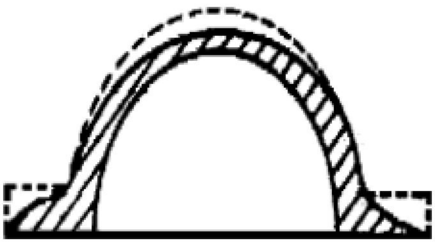
Μερικά ελαττώματα είναι κοινά σε κάθε είδος χύτευσης. Αυτά είναι:

1. **Ατελής πλήρωση** (Misruns) : Εμφανίζεται όταν ένα χυτό έχει στερεοποιηθεί πλήρως, προτού το τηγμένο μέταλλο πληρώσει την κοιλότητα του καλουπιού. Αιτίες του φαινομένου μπορεί να είναι [06]
    i. Ανεπαρκής ρευστότητα του τηγμένου μετάλλου.
    ii. Χαμηλή θερμοκρασία έγχυσης
    iii. Πολύ χαμηλός ρυθμός έγχυσης
    iv. Πολλή μικρή και λεπτή διατομή στην είσοδο του τηγμένου μετάλλου στην κοιλότητα του καλουπιού.
2. **Cold Shuts**: Συμβαίνει όταν δύο μέρη του τηγμένου μετάλλου ρέουν μαζί αλλά δεν πραγματοποιείται συνένωση μεταξύ τους, εξαιτίας πρόωρης ψύξης. Οι αιτίες συναφείς με αυτές της προηγούμενης ατέλειας.
3. **Ψυχρές σταγόνες** (Cold Shots) : Συμβαίνει όταν παρουσιάζεται πιτσίλισμα κατά την έγχυση και στερεά σφαιρίδια μετάλλου σχηματίζονται τα οποία εγκλωβίζονται στο χυτό. Για την αποφυγή του απαιτούναται κατάλληλες διαδικασίες έγχυσης και ειδικές είσοδοι ώστε να αποφεύγεται το πιτσίλισμα.
4. **Διακενώσεις** (*shrinkage Cavity):* Εμφανίζεται όταν συνθλίβεται η επιφάνεια του μετάλλου ή αδειάζει εσωτερικά το χυτό , φαινόμενο που προκαλείται από την υποχώρηση εκ συστολής κατά τη στερεοποίηση και περιορίζει τη ψύξη του διαθέσιμου τηγμένου μετάλλου στην τελευταία περιοχή. Μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση προσεπιγχωνευμάτων ή οχετών έγχυσης, οι οποίοι επιτρέπουν την τροφοδοσία με ρευστό μέταλλο της συνεχώς υποχωρούσας λόγω συστολής μάζας του υγρού.
5. **Θερμές ρωγματώσεις** (*hot tearing, hot cracking):* Εμφανίζονται εξαιτίας της απότομης συστολής του ρευστού και της ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων.
6. **Αέρια εγκλείσματα** (*gas inclusions*): Είτε εκλεύονται από το τήγμα, είτε προέρχονται από τη χημική αντίδραση σε υψηλή θερμοκρασία μεταξύ των συστατικών του τήγματος και της ατμόσφαιρας ή της υγρασίας της άμμου χύτευσης. ‘Οταν τα αέρια εγκλωβίζονται στη μάζα του χυτού δημιουργούν τα **σπήλαια**, ενώ όταν εντωπίζονται σε επιφανειακές περιοχές χαρακτηρίζονται ως **φυσαλλίδες**. Συνήθως μαρατηρούνται σε ενδιάμεση ζώνη παράλληλη προς τον κατακόρυφο άξονα του πλινθώματος.

7. **Γεωμετρικές παραμορφώσεις κι εξογκώματα** λόγω κακής τοποθέτησης του τύπου, γεωμετρικής πολυπλοκότητας του χυτού ή κακής συμπίεσης του αποτυπώματος.



Σχήμα 1.25: (1) Ατελής πλήρωση, (2) Cold shuts, (3)Ψυχρές σταγόνες, (4)Διακενώσεις, (5)Θερμές ρωγματώσεις

(6) (7)

Σχήμα 1.26 : (6) Αέρια εγκλείσματα, (7) Γεωμετρικές παραμορφώσεις

ΥΛΙΚΟ ΧΥΤΕΥΣΗΣ - ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

ΓΕΝΙΚΑ – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το **αργίλιο** ή **αλουμίνιο** είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο **Al** και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο - στοιχείο που ανήκει στην ομάδα III_A (13) του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο *βωξίτης*. Το αλλουμίνιο μετά την εξόρυξη του μετατρέπεται σε αλουμίνα και στη συνέχεια με τα ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο αλουμίνιο. Η σημερινή υψηλή τεχνολογία και οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου:[15]

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

	Στοιχεία	Μον. μέτρ.
Ατομικό βάρος	26,98	
Πυκνότητα (20 ^oC)	2,6898	gr/cm^3
Σημείο Τήξη	660,2	^oC
Γραμμική διαστολή (0-100 ^oC)	$23{,}5X10^{-6}$	$(m/m)/^oC$
Ηλεκτρική Αντίσταση (20 ^oC)	2,69	μΩcm
Μέτρο Ελαστικότητος (Ε)	68,3	GPa
Μέτρο Στρέψης (G)	25,5	GPa
Συντελεστής Poisson	0,34	

Σχήμα 1.27 : Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου

Το αλουμίνιο μεταποιείται με διέλαση, με έλαση, με χύτευση, με μηχανουργικά εργαλεία για την παραγωγή προϊόντων η τμημάτων διαφόρων προϊόντων, οπότε και τα αποκαλούμε ημι-προϊόντα για χρήση σε μηχανολογικές και ηλεκτρικές εφαρμογές.

Η χρήση του αλουμινίου και των κραμάτων του εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση πολύ μεγάλη μηχανική αντοχή του σε σχέση με το βάρος του, καθιστούν το αλουμίνιο ένα ιδανικό υλικό για την κατασκευή μεταφορικών μέσων λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται.

Το αλουμίνιο ως υλικό συσκευασίας δεν είναι τοξικό, είναι αδιαπέραστο από υγρά και αέρια και εξασφαλίζει την υγιεινή των τροφίμων όταν και όπου χρησιμοποιείται για την συσκευασία τους. Στην οικοδομή αποτελεί ένα από τα βασικά υλικά. Είναι αδιάβρωτο από καιρικούς παράγοντες και δίνει μοναδικές λύσεις στην κατασκευή μοντέρνων κτιρίων, στην ανακατασκευή, την ανακαίνιση ή συντήρηση παλαιών κτιρίων με ιστορική και αρχιτεκτονική αξία.

Οι χαρακτηρισμοί αυτοί είναι κάθε άλλο παρά τυχαίοι. Το αλουμίνιο έχει κάποιες ιδιότητες, πολύτιμες θα έλεγε κανείς που το καθιστούν ως το ιδανικό υλικό για τις κατασκευές οι οποίες με τη σειρά τους είναι ιδιαίτερα αποδοτικές, εξαιρετικά ποιοτικές, ανθεκτικές και λειτουργικές.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το αλουμίνιο, σε σχέση με άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη δόμηση, είναι το πιο μοντέρνο υλικό. Μόλις στα μέσα του 20ου αιώνα άρχισε να χρησιμοποιείται και ειδικά στην Ελλάδα στην δεκαετία του 60.

Αυτό δεν είναι τυχαίο εφόσον διαθέτει πολύτιμα χαρακτηριστικά και ιδιότητες όπως:[02]

- Υψηλή ανθεκτικότητα απέναντι στην ατμοσφαιρική διάβρωση
- Το αλουμίνιο δε μαγνητίζεται και δεν είναι τοξικό. Ακόμα και σε περίπτωση πυρκαγιάς δεν καίγεται και δεν απελευθερώνει βλαπτικές ουσίες για τον άνθρωπο ή το περιβάλλον
- Διαθέτει καλές μηχανικές αντοχές, κυρίως αντοχή σε εφελκυσμό, διάτμηση και θλίψη.
- Έχει μικρή θερμική διαστολή και οι αρχικές διαστάσεις του διατηρούνται ακόμη και έπειτα από πολλά χρόνια
- Είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού
- Είναι υλικό που ανακυκλώνεται 100% χωρίς να χάνει καμιά από τις ιδιότητες του. Μάλιστα στη φάση της ανακύκλωσης απαιτείται μόνο το 5% της ενέργειας που απαιτήθηκε για την παραγωγή του.
- Είναι εύπλαστο. Μπορεί να διαμορφωθεί σε κάθε σχήμα το οποίο διατηρεί αναλλοίωτο στην συνέχεια.
- Παράγεται στην Ελλάδα από ελληνικό βωξίτη

Το μεταλλικό αλουμίνιο έχει (φαινομενικά) μεγάλη ικανότητα στο να αντιστέκεται στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου του, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (*φαινόμενο της παθητικοποίησης*). Επίσης, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, έγινε στρατηγικό μέταλλο για την ναυπηγική και αεροδιαστημική (και όχι μόνο) βιομηχανία. Είναι, επίσης, εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία, τόσο αυτούσιο ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διαφόρων ενώσεών του.

ΚΡΑΜΑΤΑ

Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς (εκλέπτυνση κόκκου, μετασχηματισμό).

ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Προσθήκη	% κ/β	%άτομα	Θερμοκρασία °C
Cu	5,6	2,5	745
Mg	14,9	16,3	569
Mn	1,8	0,9	944
Si	1,6	1,6	798
Zn	82,8	66,4	447
Mg_2Si	1,8	1,9	740
$MgZn_2$	16,9	9,6	614

Σχήμα 1.28.. Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων

Ο πίνακας 1 δείχνει τη μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται. Οι τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, και η παρουσία και άλλων στοιχείων στο κράμα επηρρεάζει την διαλυτότητα. Προσθήκες μεγαλύτερες από τη μέγιστη διαλυτότητα πολλές φορές γίνονται, ειδικά με το πυρίτιο και αυτό έχει σα συνέπεια τη παρουσία ετερογενών σωματιδίων στο στερεό διάλυμα.

Για τα κράματα χύτευσης το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου: [14]

- Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.
- Το δεύτερο και τρίτο ψηφία δείχνουν τις διάφορες μορφές του κράματος.
- Το τέταρτο ψηφίο δείχνει αν είναι χυτό (casting) (0) ή χελώνα (ingot) (1,2)

1xx.x Καθαρό Al (Al >99,00%)

2xx.x Κράματα Al-Cu

3xx.x Κράματα Al-Si + Cu και / η Mg.

4xx.x Κράματα Al-Si

5xx.x Κράματα Al-Mg

6xx.x Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

7xx.x Κράματα Al-Zn

8xx.x Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία

9xx.x Κράματα Al-με άλλα στοιχεία

Για τη διευκόλυνση των χρηστών των κραμάτων αλουμινίου , το τετραψήφιο χαρακτηριστικό κάθε κράματος που αναφέρθηκε πριν συνοδεύεται από ένα γράμμα και από ένα έως τρία ψηφία, όπου απαιτείται τα οποία υποδηλώνουν την ακολουθία των κατεργασίων (θερμικών ή μη), που έχουν υποστεί, για τη βελτίωσει των ιδιοτήτων τους.

F - Όπως παράγεται (χωρίς θερμική).

0 - Με ανόπτηση.

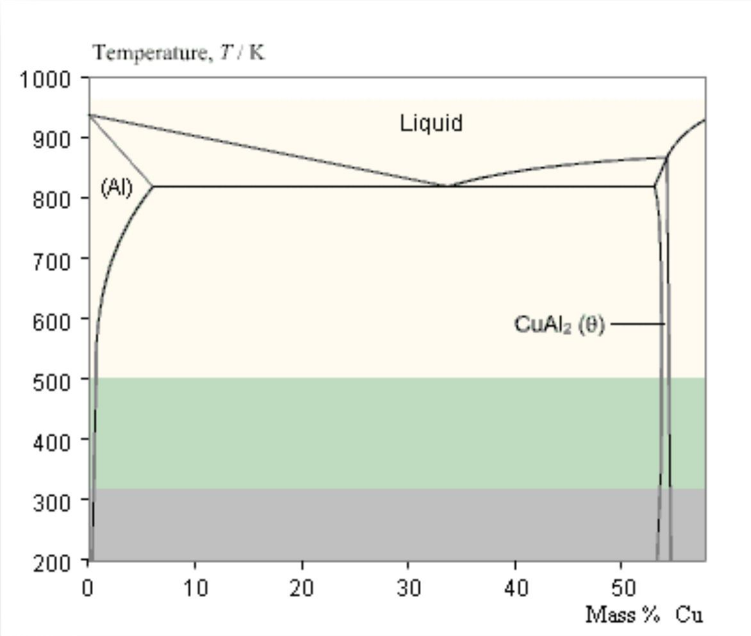
H - Ψυχρηλατημένο (Σκληρυμένο)

W - Με θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης

T - Με θερμική κατεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες. Συνήθως με σκλήρυνση μετά από υπερβαφή και κατακρήμνιση. Προσθήκη αριθμού δείχνει διάφορες μορφές πχ T6 θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και σκλήρυνσης με τεχνητή γήρανση.[16]

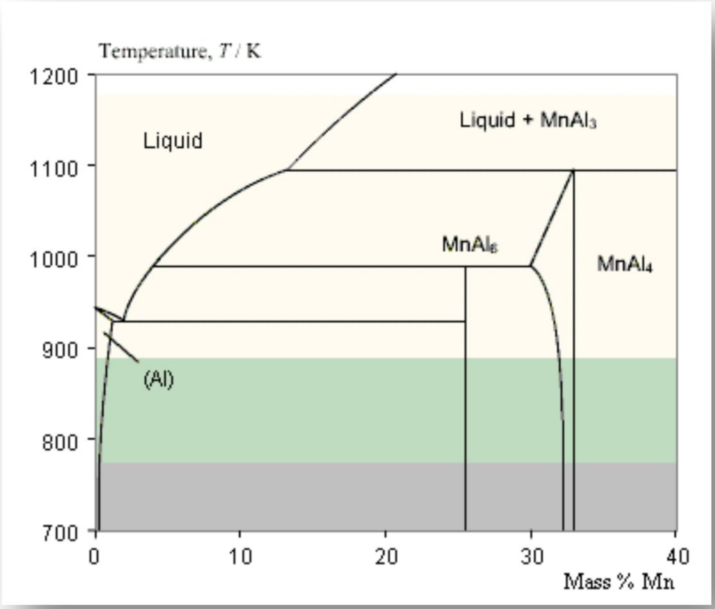
Στη συνέχεια δίνονται τα διμερή διαγράμματα φάσεων. Από όλα τα κύρια κραματικά στοιχεία μόνο ο ψευδάργυρος έχει σημαντική διαλυτότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μάλιστα λίγες μονάδες. Έτσι κάτω από συνθήκες ισορροπίας οι περισσότερες κραματικές προσθήκες βρίσκονται διεσπαρμένες στη μήτρα του αλουμινίου και το ενισχύουν με διασπορά. Πάντως δεν επιδέχονται όλα τα κράματα θερμική κατεργασία και απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση με ψυχρηλασία. Παρουσιάζονται στη συνέχεια οι επιδράσεις των κραματικών προσθηκών στο αλουμίνιο αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι σπάνια τα κράματα είναι διμερή και συνήθως μικρές ποσότητες από άλλα στοιχεία προστίθενται για να προσδώσουν ειδικές ιδιότητες.

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σαν κύριο κραματικό στοιχείο, η μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες από 1 έως 10%.[15]



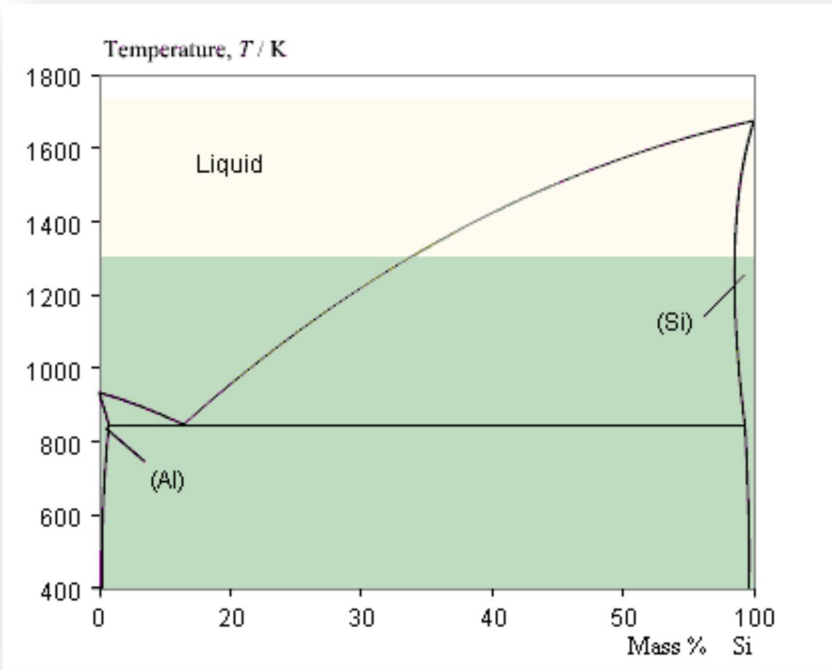
Σχήμα 1.29. Διαλυτότητα χαλκού στο αλουμίνιο.

Το μαγγάνιο έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου αλλά σε περιεκτικότητες περίπου 1% σχηματίζει μια σειρά από κατεργάσιμα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Προστίθεται ευρέως σαν συμπληρωματικό στοιχείο σε κράματα (επιδεκτικά η μη επιδεκτικά θερμικής κατεργασίας) και προσδίδει σημαντική ενίσχυση.[15]



Σχήμα 1.30. Διαλυτότητα Μαγγανίου στο αλουμίνιο.

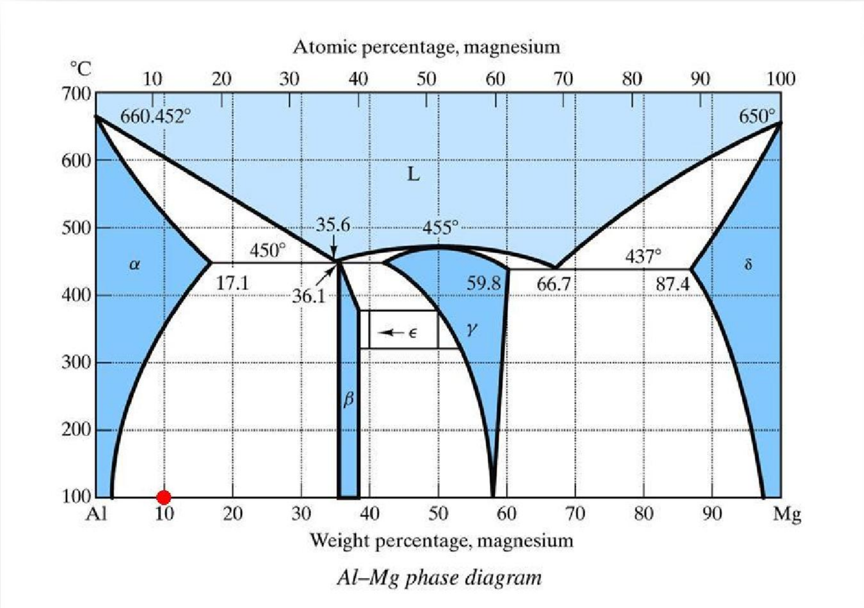
Το πυρίτιο μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει την ρευστότητα του αλουμινίου. Αυξάνει επίσης σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.



Σχήμα 1.31. Διαλυτότητα του Πυριτιού στο Αλουμίνιο.

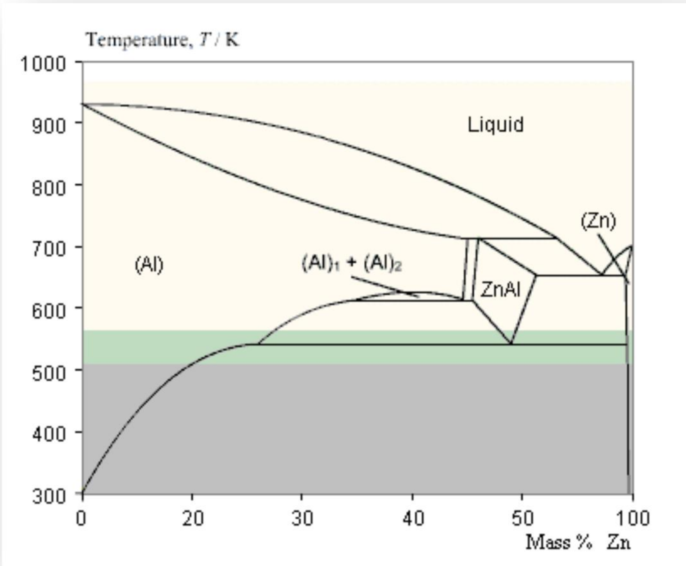
Το μαγνήσιο παρέχει σημαντική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών της ψυχρηλασίας. Έχει σχετικά μεγάλη διαλυτότητα στο στερεό αλουμίνιο αλλά τα κράματα Al-

Mg που περιέχουν Mg λιγότερο από 7% δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Το Mg προστίθεται επίσης σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία κυρίως χαλκό και ψευδάργυρο, για ακόμη καλύτερη ενίσχυση της αντοχής.[15]



Σχήμα 1.32. Διαλυτότητα μαγνησίου στο αλουμίνιο.

Ο ψευδάργυρος εισάγεται στα χυτευτικά κράματα και σε συνδυασμό με το μαγνήσιο στα κράματα διαμόρφωσης, παράγει κράματα που έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ των κραμάτων του αλουμινίου.[15]



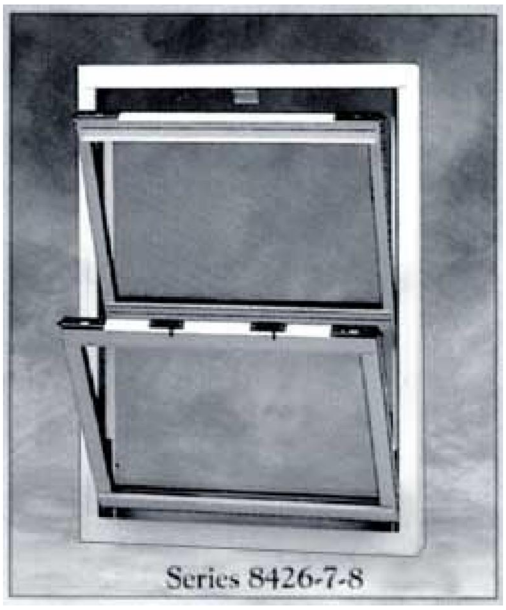
΄Σχήμα1.33. Διαλυτότητα ψευδαργύρου στο αλουμίνιο.

ΧΡΗΣΕΙΣ

Η μεγαλύτερη χρήση του αλουμινίου πραγματοποιείται από τη βιομηχανία αυτοκινήτου. Αυτό οφείλεται στην ελαφρότητα του στο μικρό ειδικό βάρος αλλά και στις διακοσμητικές ικανότητες του αλουμινίου. Η βιομηχανία αεροπλάνων έχει σαν κύριο κατασκευαστικό υλικό τα ελαφρά κράματα του αλουμινίου.[14]

Η ηλεκτρική βιομηχανία είναι επίσης μια μεγάλη καταναλώτρια αλουμινίου. Το αλουμίνιο έχει μεγάλη αγωγιμότητα ίση προς το 62% του χαλκού, αλλά είναι τρεις φορές ελαφρότερο. Έτσι, χρησιμοποιείται για την κατασκευή εναέριων γραμμών είτε μόνο του, είτε με χάλυβα σε ράβδους επαφής και σε περιςλίξεις.

Αλλά και στην οικοδομική το αλουμίνιο βρίσκει μεγάλη χρήση. Χρησιμοποιείται στα μεταλλικά κουφώματα, κιγκλιδώματα, σε επενδύσεις προσόψεων αλλά και σε αντικατάσταση συνήθως δομικών υλικών (κατασκευή τοίχων από αλουμίνιο).



Επειδή το αλουμίνιο είναι αδιαπέραστο από υπεριώδεις ακτινοβολίες χρησιμοποιείται σαν υλικό συσκευασίας. Λεπτότατα φύλλα αλουμινίου χρησιμοποιούνται στις συσκευασίες σοκολάτας, καπνού κ.α. Άλλοτε χρησιμοποιείται ως σύνθετο υλικό με χαρτί όπως στη συσκευασία του βουτύρου. Επίσης μόνο του ή στη σύνθετη μορφή του με πλαστικό, χρησιμοποιείται στην κατασκευή σωληναρίων, θηκών, κουτιών , πομάτων κ.α

Λεπτά φύλλα αλουμινίου, μετά από επεξεργασία (ανοδική οξείδωση), χρησιμοποιούνται ως διακοσμητικά σε ηλεκτρικές συσκευές, στα αυτοκίνητα ή και στην κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων. Επίσης το καθαρό αλουμίνιο λόγω της στιλπνότητας του (που διατηρείται με ανοδική οξείδωση), χρησιμοποιείται στη χρυσοχοϊα και την κοσμηματοποιία. Ακόμα οι πλαστικές ιδιότητες του το καθιστούν κατάλληλο για την κατασκευή γλυπτών έργων.[14]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[01] Bertone, J. E. (10 October 2002). *Practical Metallurgy and Materials of Industry (6th Edition).*

[02] Campbell, M. J. (12 June 2003). *Castings, Second Edition.*

[03] Jr., F. R. (23 February 2006). *Lost-Wax Casting: Old, New, and Inexpensive Methods.*

[04] Tylecote, R. F. (1 June 2012). *A History of Metallurgy (matsci).*

[05] Verhoeven, J. D. (7 July 1975). *Fundamentals of Physical Metallurgy.*

[06] Warner, D. A. (2009). *Metallurgy Fundamentals: Ferrous and Nonferrous.*

[07] D.Chastain, S. C. (March 2004). *Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry, Volume 2.*

[08] Σορcak, J. (3 June 1986). *Handbook of Lost Wax or Investment Casting.*

[09] Feinberg, W. (December 1983). *Lost-Wax Casting: A Practitioner's Manual.*

[10] Campbell, J. (25 August 2011). *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design.*

[11] Collins, N. (26 March 2012). *ULTIMATE GUIDE TO LOST WAX CASTING.*

[12] Fisher, W. K. (1 June 1998). *Fundamentals of Solidification.*

[13] O'Reilly, B. C. (November 2002). *Solidification and Casting: (Materials Science and Engineering).*

[14] Green, E. a. (1 December 2007). *Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability.*

[15] Rooy, J. G. (1 december 2004). *Aluminum alloy castings - Properties processes and applications.*

[16] Παπάζογλου, Β. Ι. (1998). *Ναυπηγική Τεχνολογία.*

[17] Παντελής, Δ. (1996). *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών.*

[18] Romanoff, P. (1981). *The Complete Handbook of Centrifugal Casting.*

[19] Pomanoff, K. (1975). *The art and science of centrifugal casting.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2Ο

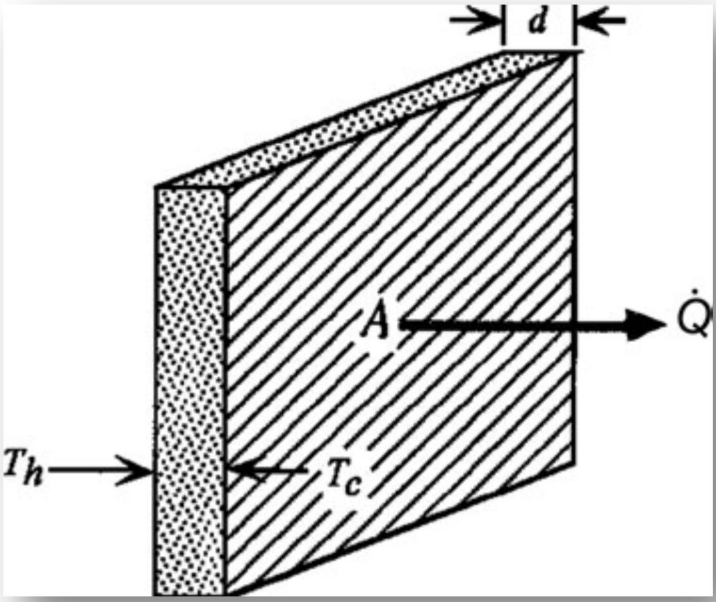
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ Σ.Μ.Θ

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η μεταφορά θερμότητας, με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία αποτελεί ένα θέμα καθοριστικής σημασίας κατά τις διαδικασίες τήξης και στερεοποίησης ενός κράματος ή καθαρού μετάλλου εξαιτίας της πρόσδοσης ή απελευθέρωσης λανθάνουσας θερμότητας που εμπλέκεται σε κάθε μια από τις παραπάνω διαδικασίες. Κατά τη στερεοποίηση, η μεταφορά θερμότητας και το πεδίο της θερμοκρασίας ικανοποιούν το νόμο του Fourrier και τη διατήρηση της ενέργειας. Ο ρυθμός πήξης εξαρτάται σημαντικά και από το υλικό αλλά και από το σύστημα υγρού – στερεού – μεταλλικό επίστρωμα/καλούπι και επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμική αγωγιμότητα, μια ιδιότητα που βασίζεται καθαρά στο υλικό, καθώς και από τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας από το στερεοποιούμενο σύστημα στο γειτονικό του περιβάλλον.

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ FOURRIER

Σύμφωνα με το νόμο του Fourrier η «ροή θερμότητας» όπως αποκαλείται η μετάδοση του ρεύματος θερμότητας , διαμέσω ενός στερεού, είναι ανάλογη προς το πάχος του στερεού σώματος και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των άκρων του όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα: [04]



Σχήμα 2. 1 : Η μεταφερομενη θερμοτητα ανα μοναδα επιφανειας για πλακα ορθογωνικης διατομής A, πάχους d , με βαθμίδα θερμοκρασίας $\left(T_h - T_c\right)$.

και δίνεται από τον τύπο :

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \left(\frac{T_h - T_c}{d} \right) \qquad (1)$$

όπου $k \rightarrow$ *ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας* με αγωγή ή αλλιώς *θερμική αγωγιμότητα.*

Η θερμική αγωγιμότητα είναι χαρακτηριστική ιδιότητα του κάθε υλικού. Ο νόμος του Fourrier μπορεί να γενικευτεί για οποιαδήποτε περιοχή μέσα σε ένα υλικό στο οποίο παρατηρείται απειροστή διαφορά θερμοκρασίας σε μια κατεύθυνση $\vec{r}$. Η κατεύθυνση της $\vec{r}$ θα είναι αυτή στην οποία θα είναι μέγιστη η μεταβολή της θερμοκρασίας .

$$\frac{\dot{Q}}{A} \equiv \dot{q}_n = -k \cdot \frac{dT}{d\left|\vec{r}\right|} \qquad (2)$$

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες ο *νόμος του Fourrier* μπορεί να γραφεί για ισότροπα υλικά ως :

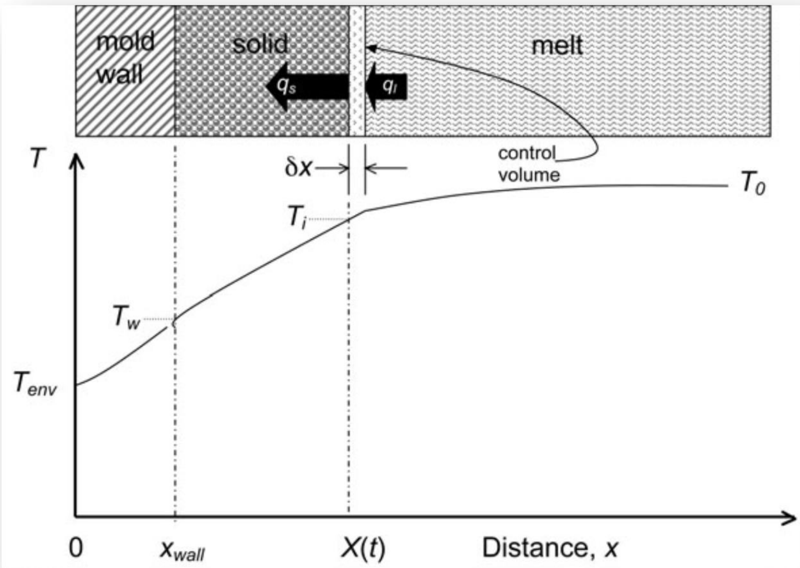
$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T = -k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \cdot \hat{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \hat{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \hat{e}_z \right) \qquad (3)$$

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΥΝΘΗΚΗ STEFAN)

Ένα τοπικό ισοζύγιο ενέργειας μπορεί να αναπτυχθεί σε στοιχειώδη ποσότητα υγρού, μάζας dm_l μοναδιαίας διατομής και πάχους dx, κατά την αλλαγή φάσης σε απειροστό χρόνο dt.

Αυτό το ισοζύγιο πρωτοδιατυπώθηκε από τον Josef Stefan στα τέλη του 19ου αιώνα για προβλήματα μεταφοράς θερμότητας/αλλαγής φάσης. Το «τοπικό ισοζύγιο ενέργειας» σε ένα κινούμενο όριο, κατά την αλλαγή φάσης, ονομάζεται «συνθήκη Stefan».

Αυτό το ενεργειακό ισοζύγιο περιλαμβάνει τη *ροή θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας,* $\dot{q}$, πρός ή από, μια κινούμενη επιφάνεια τήγματος καθώς και την απορρόφηση ή απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας στη διεπιφάνεια. [06]



Σχήμα 2.2 : Μεταβολές θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός καλουπιού , δεδομένου ότι αυτή γίνεται μονοδιάστατα. Οι εσωτερικές διεπιφάνειες στερεού – καλουπιού x_{wall} *καθώς και το κινούμενο μέτωπο στερεοποίησης* $X(t)$ *απαιτούν την πρόσδοση οριακών συνθηκών για το σωστό καθορισμό του προβλήματος. Επίσης είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν, η αρχική θερμοκρασίας τήξης* T_0 *και* T_{env} *του περιβάλλοντος πλησίον του καλουπιού. Οι* T_w *και* T_i *ικανοποιούν τη συνέχεια των εσωτερικού πεδίου θερμοκρασίας.*

Συγκεκριμένα, σε ένα μικρό χρονικό διάστημα dt, "η συνθήκη Stefan" , απαιτεί ότι οι *ροές θερμότητας* κοντά στη διεπιφάνεια υγρού – στερεού, $\dot{q}_e$ για το τήγμα, και $\dot{q}_s$ για το στερεό, συμπριλαμβανομένης της λανθάνουσας θερμότητας που απελευθερώνεται κατά τη μετατόπιση της διεπιφάνειας κατά dx να δίνουν *μηδενικό άθροισμα*. Η «συνθήκη Stefan» αποτελεί μια μορφή «*τοπικής διατήρησης της ενέργειας*». Διατυπώνει ότι μια διεπιφάνεια απορροφά ή απελευθερώνει ενέργεια αλλά δεν την αποθηκεύει

$$\left(\dot{q}_s - \dot{q}_l\right)\cdot dt + \frac{\Delta H_f}{\Omega}\cdot dx = 0 \qquad (4)$$

$\dot{q}_s \rightarrow$ *ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας* που απομακρύνεται από τη μια πλευρά ενός στοιχειώδου όγκου ελέγχου.

$\dot{q}_l \rightarrow$ *ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας* που εισέρχεται από την άλλη πλευρά ενός στοιχειώδου όγκου ελέγχου.

$\frac{\Delta H_f}{\Omega} \rightarrow$ *λανθάνουσα θερμότητα* που δημιουργείται κάτά την κίνηση του τμήματος , ανά μονάδα όγκου.

$\frac{\Delta H_f}{\Omega}\cdot dx \rightarrow$ *η ενθαλπία πήξης ανά μονάδα όγκου* πολλαπλασιασμένη με το στοιχειώδη όγκο $A\cdot dx = dx$ (*αφού Α, μοναδιαία επιφάνεια*) ενός υλικού που στερεοποείται σε χρόνο dt

Μια άλλη διατύπωση της παραπάνω εξίσωσης είναι :

$$\left(\dot{q}_s - \dot{q}_l\right)\cdot dt = -\rho\cdot\Delta H_f \cdot \frac{dX(t)}{dt} \qquad (5)$$

όπου $\rho = \Omega^{-1} \rightarrow$ η μοριακή πυκνότητα, αντίστροφη του μοριακού όγκου.

Η αλλαγή στην πυκνότητα λόγω της μετάβασης από $l \rightarrow s$ δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε κατά τη στερεοποίηση ή την τήξη.

Έτσι με βάση την παραπάνω ανάλυση , αναφερόμενοι στο σχήμα 2 και θέτοντας ως θετική την κατεύθυνση από αριστερά προς δεξία στον όγκο ελέγχου, η ροή θερμότητας $\dot{q}_s$ παριστάνει μια πρόσδοση θερμότητας στο στοιχειώδη όγκο (*αρνητική)* , ενώ η $\dot{q}_l$ παριστάνει την απομάκρυνση θερμότητας από το τηγμένο μέταλλο (*θετική σύμφωνα με τη σύμβαση). [07]*

Η επιφανειακή ταχύτητα $\frac{dX(t)}{dt}$ είναι θετική για κίνηση στον +*x άξονα.*

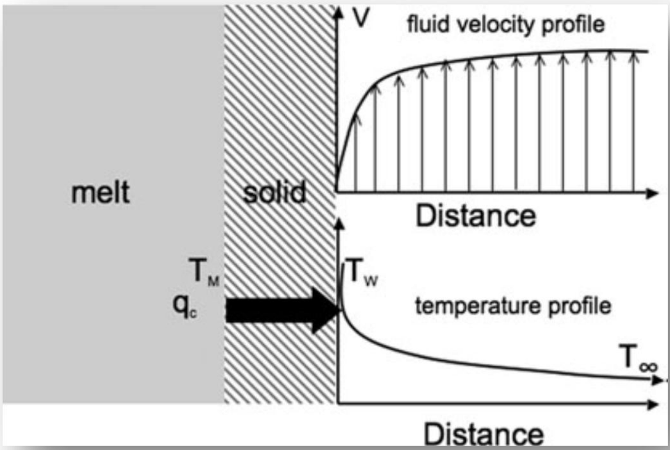
Από τις σχέσεις *(3),(5)* προκύπτει , σύμφωνα πάντα με τη σύμβαση για τα πρόσημα που αναφέραμε παραπάνω, ότι:

$$k_l\cdot\left(\frac{dT_l}{dx}\right)_{x=X^-} - k_s\cdot\left(\frac{dT_s}{dx}\right)_{x=X^+} + \rho\cdot\Delta H_f\cdot\frac{dX}{dt} = 0 \qquad (6)$$

Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ NEWTON : ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμική αγωγιμότητα δεν είναι ο μοναδικός μηχανισμός για τη μεταφορά ενέργειας κατά τη στερεοποίηση. Συναγωγή και ακτινοβολία είναι δύο ακόμα μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας από στερεοποιούμενα σώματα στο εξωτερικό τους περιβάλλον.

Ο νόμος του Νεύτωνα για την απόψυξη εκφράζει φαινομενικά μια γραμμικοποίηση, απλοποιώντας το σύνθετο πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία, κοντά σε μια θερμή στερεά επιφάνεια όπως αυτή ενός χυτού. [06]



Σχήμα 2.3 : Ροή θερμότητας που απελευθερώνεται στη διεπιφάνεια τήγματος – στερεού και μεταδίδεται προς το εξωτερικό σύνορο που βρίσκεται σε θερμοκρασία T_w . Δίπλα δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα της κατανομής της ταχύτητας του γειτονικού ρευστού καθώς και η μεταβολή της θερμοκρασίαςκατά την απομάκρυνση από το σύνορο. Η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται παραβολικά κοντα στην επιφάνεια του συνόρου.

Το σχήμα λοιπόν δείχνει ένα σύστημα τήγματος – στερεού σε επαφή με ένα ρευστό περιβάλλον συναγωγής. Το ρευστό στη συνοριακή επιφάνεια έχει θερμοκρασία T_w , διαφορετική από αυτή που έχει το ρευστό μακριά από την επιφάνεια T_∞ . Η ενέργεια που συναγάγεται ή και ακτινοβολείται είναι:

$$\dot{q}_n = h \cdot \left(T_W - T_\infty\right) \quad (7)$$

Όπου το h σε αντίθεση με το k δεν είναι ιδιότητα του υλικού, έχει επίσης διαφορετική μονάδα μέτρησης $\left(W / m^2 \cdot K \right)$.

Η παραπάνω εξίσωση συνιστά τον ορισμό του “*h*” που εμπεριέχει όλους του ακόλουθους παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από μια συνοριακή επιφάνεια στο γειτονικό περιβάλλον.

i. *Θερμοφυσικές ιδιότητες του περιβάλλοντος (ρευστό: αέρας/υγρό).*
ii. *Επιφανειακή τραχύτητα και γεωμετρία*
iii. *Τύπος ροής ρευστού*
iv. *Φασματικά χαρακτηριστικά της ακτινοβολούσας επιφάνειας*
v. *Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία(γραμμικοποιημένη).*
vi. *Ολικές διαφορές θερμοκρασίας*

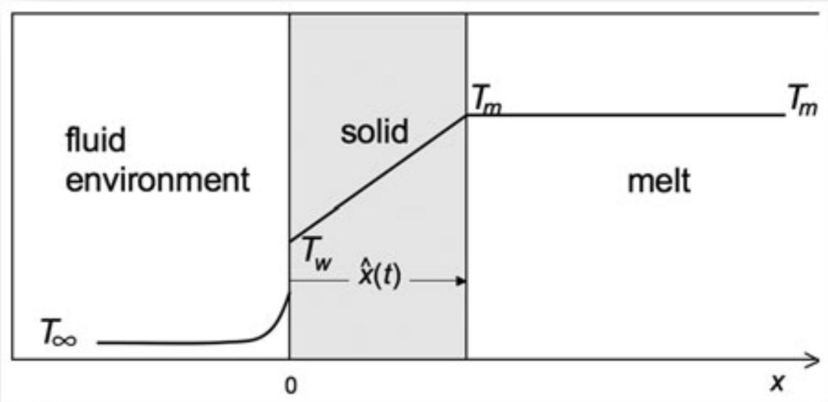
Γενικά, η ιδέα ενός συντελεστή μεταφοράς θερμότητας *h,* αποτελεί μια χρήσιμη προσέγγιση για την περιγραφή φαινομένων όπου υπάρχουν σύνθετες θερμικές αλληλεπιδράσεις συμπεριλαμβανομένων συναγωγής και ακτινοβολίας κατά μηκος κενών στα τοιιχώματα του καλουπιού ή σχηματιζόμενων κενών κατά τη στερεοποίηση. [07]

Αν και κατά γενική ομολογία, η γνώση για την εύρεση σωστών τιμών ΣΜΘ είναι εμπειρική, οι μηχανικοί έχουν κατορθώσει να τους συσχετίσουν με μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών χρησιμοποιώντας γνώσεις από τη μεταφορά της θερμότητας και της ροής των ρευστών για στρωτές και τυρβώδεις ροές.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ας θεωρήσουμε το απλοποιημένο μοντέλο μετάδοσης θερμότητας, *στην κατεύθυνση +x* ενός καθαρού μετάλλου που έχει φτάσει στο σημείο τήξης του. Η ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκους του τμήματος που έχει στερεοποιηθεί με θερμοκρασία $T_s(x,t)$ θεωρείται ότι αναπτύσσεται σαν ένα γραμμικό πεδίο και εξασφαλίζει ότι ικανοποιούνται οι ακριβείς συνθήκες που θα συζητηθούν παρακάτω.

$$T_s(x,t) = T_w + \frac{T_m - T_w}{\hat{x}(t)} \cdot x \quad , (x \geq 0) \qquad (8)$$



Σχήμα 2.4: Κατανομή θερμοκρασίας στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού.

Η βαθμίδα της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο του στερεού σε χρόνο t, δίνεται από το γραμμικό τύπο:

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{T_m - T_w}{\hat{x}(t)} \tag{9}$$

Η ροή θερμότητας $\dot{q}^+$ που φτάνει στο όριο $x = 0^+$ δίνεται από το νόμο του Fourrier (Εξ.3), σε συνδυασμό με το πεδίο θερμοκρασίας που ορίσαμε προηγουμένως. Η ροή θερμότητας $\dot{q}^-$ που απομακρύνεται από το όριο $x = 0^-$ δίνεται από την εξίσωση του Newton *(Εξ.7):*

$$\dot{q}^- = -h \cdot (T_w - T_\infty) \tag{10}$$

Απαιτείται $\dot{q}^- = \dot{q}^+ = \dot{q}_{wall}$ ώστε να εξασφαλίσουμε μια αργή αλλαγή θερμικής ενέργειας από το τήγμα δια μέσω του στερεοποιημένου τμήματος του και εν συνεχεία στο περιβάλλον. Εάν απαλείψουμε τη θερμοκρασία του τοιχώματος T_w από τις εξισώσεις *(9), (10)*, η ροή θερμότητας δίνεται από τον τύπο :

$$\dot{q}_{wall} = \frac{T_m - T_\infty}{\frac{1}{h} + \frac{\hat{x}(t)}{k_s}} \tag{11}$$

Η παραπάνω εξίσωση μας δείχνει ότι η ροή θερμότητας στη θέση $x = 0$ έχει δύο ανεξάρτητα όρια.

i. *Λεπτό στερεό επίστρωμα*: Υψηλά θερμικά αγώγιμο υλικό $\frac{\hat{x}(t)}{k_s} = \frac{1}{h}$. Η εξίσωση *(11)* μειώνεται στο $\dot{q}_{wall} = h \cdot (T_m - T_\infty)$. Αυτό εκφράζει το γεγονός ότι , όταν το $\hat{x}(t)$ είναι μικρό , μετά από μικρό διάστημα πήξης, ο ρυθμός στερεοποίησης, μετρούμενος με ρυθμούς απελευθέρωσης λανθάνουσας θερμότητας, εξαρτάται αποκλειστικά από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας *h* . Το πάχος του στερεοποιημένου επιστρώματος έχει μικρή επίδραση στο ρυθμό απόψυξης.

ii. *Παχύ στερεό επίστρωμα*: Ελαφρώς θερμικά αγώγιμο υλικό $\frac{\hat{x}(t)}{k_s}$? $\frac{1}{h}$. Η ροή θερμότητας μειώνεται στο $\dot{q}_{wall} = \frac{k_s \cdot (T_m - T_\infty)}{\hat{x}(t)}$. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο ρυθμός στερεοποίησης καθορίζεται από την αντίσταση στη μετάδοση της θερμότητας διαμέσω του ψυγμένου στερεού και περιορίζεται από τη βαθμίδα θερμοκρασίας που δημιουργείται μέσα στο στερεό καθώς το $\hat{x}(t) \rightarrow L$, η βαθμίδα πέφτει ακόμα περισσότερο και ο ρυθμός πήξης μειώνεται.

Εάν η εξίσωση *(11)* αντικατασταθεί στο ισοζύγιο ενέργειας κατά Stefan μπορούμε να βρούμε τη σχεση μεταξύ $\frac{d\hat{x}}{dt}$ και της μεταδιδόμενης θερμότητας. [06]

$$\rho \cdot \Delta H_f \cdot \frac{d\hat{x}}{dt} = \frac{T_m - T_\infty}{\frac{1}{h} + \frac{\hat{x}(t)}{k_s}} \qquad (12)$$

ΔΙΑΤΥΠΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ Σ.Μ.Θ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Οι **Nayak & Sundarraj** πραγματοποίησαν προσομοιώσεις για κράμα Al – Si χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό πρόγραμμα προσομοίωσης της χύτευσης. Οι καμπύλες απόψυξης που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις επαληθεύτηκαν με πειραματικά δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Από την παρουσίαση τους προκύπτει ότι ο καθορισμός της αρχικής τιμής του Σ.Μ.Θ μεταξύ *επένδυσης – μετάλλου* και *καλουπιού – μετάλλου*, έχει καθοριστικό ρόλο στις καμπύλες απόψυξης. Επιπροσθέτως, και αφότου επιλέξανε μια αρχική τιμή για το Σ.Μ.Θ, οι ρυθμοί στερεοποίησης του κράματος κοντά στη διεπιφάνεια *επένδυσης – μετάλλου* ποικίλουν, καθώς σχηματίζεται ένα κενό αέρος στη διεπιφάνεια. Πάραυτα, ο σχηματισμός του κενού αέρος ο οποίος από τη μια αλλάζει την τιμή του Σ.Μ.Θ από την αρχική του, δεν επηρεάζει τις καμπύλες απόψυξης κοντά στη διεπιφάνεια *καλουπιού – μετάλλου* .

i. Οι ιδανικές τιμές για αρχικό Σ.Μ.Θ είναι:

$$3000\, {W}/{m^2 \cdot K} \quad \text{και} \quad 7000\, {W}/{m^2 \cdot K}$$

για διεπιφάνειες *άμμου – μετάλλου* και *επένδυσης (χάλυβας ή χαλκός) – μετάλλου* αντίστοιχα.

ii. Ο προσδιορισμός του αρχικού Σ.Μ.Θ είναι καθοριστικός για θερμικές και θερμομηχανικές προσομοιώσεις ανεξαρτήτως του υλικού του καλουπιού.

iii. Υπό την προϋπόθεση ότι αναφερόμαστε σε καλούπι από άμμο, με τη σωστή επιλογή ενός αρχικού Σ.Μ.Θ, μια θερμική προσομοίωση είναι αρκετή για το σωστό προσδιορισμό των καμπύλων απόψυξης , χωρίς να είναι απαραίτητη η πλήρης θερμομηχανική προσομοίωση.

iv. Όταν υπάρχει *επένδυση* στο χυτό, απαιτείται θερμομηχανική προσομοίωση διότι και ο αρχικός Σ.Μ.Θ και ο ρυθμός σχηματισμός του κενού αέρος επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία στερεοποίησης του κράματος.

Οι ***David J.Brown and Denis O' Mahoney*** προσπάθησαν με την εργασία τους να καθορίσουν οριακές συνθήκες χύτευσης μέσα από τη μελέτη της επίδρασης των παρακάτω παραμέτρων:

i. Του θερμοκρασιακού εύρους στερεοποίησης του κράματος ,

ii. *Του μεταλλοστατικού μετώπου ,*

iii. *Του πάχους του κελύφους που δημιουργείται κατά τη στερεοποίηση ,*

iv. *Της προθέρμανσης του καλουπιού και*

v. *Της γεωμετρίας της διεπιφάνειας.*

Συγκεκριμένα υποστήριξαν ότι καθώς το τηγμένο μέταλλο διαχέεται πάνω στην επιφάνεια του καλουπιού, δεν μπορεί να επιτευχθεί μια τέλεια θερμική επαφή. Αυτό είναι αποτέλεσμα παραγόντων όπως η τραχύτητα της στερεής επιφάνειας του καλουπιού, η επιφανειακή τάση του τηγμένου μετάλλου, ακαθαρσίες της επιφάνειας, και έγκλειστα αέρια. Εάν η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι κάτω από τη liquidus του κράματος, τότε, έπειτα από τη μερική στερεοποίηση του κράματος, άλλοι παράγοντες επηρεάζουν τη θερμική επαφή όπως η γεωμετρία της επιφάνειας και η πίεση που ασκείται στο στερεοποιούμενο μέταλλο. Η φύση της θερμικής επαφής μεταξύ του στερεοποιούμενου υλικού και του καλουπιού χαρακτηρίζεται από το *συντελεστή μεταφοράς θερμότητας*, ο προσδιορισμός του οποίου γίνεται με αντίστροφες τεχνικές. Είναι αναγκαίο λοιπόν , να προσδιοριστεί επακριβώς αυτή η οριακή συνθήκη προκειμένου να μοντελοποιηθεί αριθμητικά η στερεοποίηση.

Ο ΣΜΘ δίνεται από την έκφραση,

$$h_{int} = \frac{q_{int}}{\Delta T_{int}}$$

Εδώ, ΔT_{int} είναι η θερμοκρασιακή πτώση κατά μήκος της διεπιφάνειας, και q_{int} η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας. Γενικά, ο h_{int} είναι σταθερός αλλά ποικίλει κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων.

1. *Για δεδομένο καλούπι* , η κύρια μεταβλητή που πρέπει να λάβουμε υπόψιν κατά την ανάλυση του ΣΜΘ είναι *η σύσταση του κράματος*. Αυτή καθορίζει παράγοντες όπως *η επιφανειακή τάση* (του υγρού) και το *εύρος ψύξης* (freezing range), που επηρεάζουν άμεσα τον ΣΜΘ. Καθώς η *επιφανειακή τάση αυξάνεται* , καθίσταται πιο δύσκολο για το κράμα να πάρει το σχήμα του καλουπιού,με συνέπεια *να μειώνεται η επιφάνεια επαφής* και *να αυξάνεται η αντίσταση στη ροή της θερμότητας*. Κράματα με μικρό εύρος ψύξης σχηματίζουν ένα στερεό κέλυφος στην εξωτερική επιφάνεια τους και τείνουν να συστέλλονται μακριά από τη διεπιφάνεια. Καθώς όμως το εύρος ψύξης αυξάνεται το κράμα τείνει να στερεοποιείται κατά τρόπο λιγότερο κατευθυνόμενο.

2. *Αυξάνοντας το βάθος έγχυσης προς το οποίο εγχύεται το κράμα*, αυξάνει την πίεση του τηγμένου μετάλλου στη διεπιφάνεια, με αποτέλεσμα να υπερνικώνται επιφανειακές δυναμεις. Υπάρχει επίσης πιθανότητα να βοηθήσει στην αντίσταση στη θερμική συστολή του στερεού κελύφους που έχει σχηματιστεί κοντά στη διεπιφάνεια, με συνέπεια να διατηρείται καλή θερμική επαφή.
3. *Η θερμοκρασία έγχυσης* για τα περισσότερα κράματα αλουμινίου είναι 700°C. Έγχυση σε μεγαλύτερη θερμοκρασία μπορεί να κάψει τα στοιχεία του κράματος (ειδικά το Mg). Αυξάνεται επίσης το ποσοστό της «υποχώρησης εκ συστολής» καθώς και ο χρόνος στερεοποίησης ανάλογα με τη θερμοκρασία έγχυσης. Αντίστροφα, μικρή θερμότητα υπερθέρμανσης οδηγεί σε ημιτελή πλήρωση του καλουπιού. Συνεπώς, η τροποποίηση της θερμοκρασίας έγχυσης δε μας δίνει κάποιο σημαντικό πλεονέκτημα. Για τη χύτευση αλουμινίου με τη μέθοδο του χαμένου κεριού, η προθέρμανση του καλουπιού γίνεται συνήθως στους 300°C με 500°C. Επομένως, *αύξηση της θερμοκρασίας προθέρμανσης* μειώνει το ποσοστό θερμότητας που μπορεί να απορροφήσει το καλούπι, ρίχνει τη βαθμίδα της θερμοκρασίας κατά μήκος του και το ποσοστό διαστολής του μετά την έγχυση του συγκριτικά θερμότερου τηγμένου μετάλλου.
4. Διαφορετικό πάχος καλουπιού επηρεάζει

   Την ικανότητα του καλουπιού να απορροφήσει θερμότητα από το τηγμένο μέταλλο

   Την ικανότητα του να διαστέλλεται όταν θερμαίνεται.

Τα συμπεράσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Κράμα	*Πίεση υγρού μετάλλου*	*ΠροΘέρμανση καλουπιού*	*Πάχος καλουπιού*
413	Έχει μικρή επίδραση στο καλούπι/ΣΜΘ του κράματος	Μεγάλη ποικιλία σε χαμηλή προθέρμανση. Μεγάλη προθέρμανση δίνει σταθερό ΣΜΘ.	Καμιά επίπτωση στον ΣΜΘ
A356	Βασικός παράγων, καλούπι. Ο ΣΜΘ του κράματος αυξάνει με το βάθος	Μεγάλη προθέρμανση συντελεί σε μείωση του μέσου ΣΜΘ.	Παχύτερο καλούπι μειώνει ΣΜΘ.
319	Ίδιο με το A356.	Ίδιο με το 413	Ίδιο με το A356.

Οι ***Prabhu et al***. εξέτασαν τη στερεοποίηση ενός κράματος αλουμινίου σε ένα ατσάλινο κυλινδρικό καλούπι. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι *όσο μικρότερο είναι το πάχος του καλουπιού τόσο μεγαλύτερος είναι ο ΣΜΘ.*

Οι ***Micahael et al.*** σε παρόμοια μελέτη διαπίστωσαν ότι *μικρή προθέρμανση του καλουπιού* (περίπου 150 ^{o}C) συντελεί σε *ΣΜΘ αρκετά μεγάλο*. Αυτό εξηγείται, διότι, ένα καλούπι που έχει προθερμανθεί σε χαμηλή θερμοκρασία ευνοεί την άμεση στερεοποίηση στην επιφάνεια και την μείωση του ΣΜΘ από εκείνη τη στιγμή και μετέπειτα.

Οι ***Kim and Lee*** μελέτησαν τη στερεοποίηση κραμάτων αλουμινίου σε ατσάλινο κυλινδρικό καλούπι. Τα κράματα ήταν καθαρό αλουμίνιο Α356 και Α390. Για *το μεγάλης διάρκειας απόψυξης* κράμα Α356, ο ΣΜΘ έπεσε από τους 2000 $W/m^2 \cdot K$ στους 500 $W/m^2 \cdot K$ και έπειτα αυξήθηκε, καθώς η στερεοποίηση ήταν στο τελικό της στάδιο, και συνεχισε να αυξάνει από εκεί κι έπειτα. Αυτό συμβαίνει διότι τα κράματα αυτά δε δημιουργούν συνεκτική δομή στην εξωτερική τους επιφάνεια (κέλυφος) παρά μόνο όταν βρίσκονται στο 50% της στερεοποίησης. Ο ΣΜΘ αυξάνεται μετά από αυτό το σημείο. Αντίστροφα, για *τα μικρής διάρκειας απόψυξης* κράματα, που δημιουργούν στερεό κέλυφος στην επιφάνεια τους κατά τη στερεοποίηση, ο ΣΜΘ αυξήθηκε απότομα κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και μετά από αυτή. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτο, είναι διότι τα κράματα αυτά δημιουργούν ένα στερεό κέλυφος γύρω από τον πηρύνα και συστέλλονται πάνω σε αυτόν με συνεπεια να αυξάνεται η επιφανεια και η πίεση επαφης.

Οι ***Sahai and Overfelt*** ολοκλήρωσαν μια έρευνα για τον ΣΜΘ για ένα κράμα νικελίου σε κυλινδρικό καλούπι και καλούπι σε σχήμα πλάκας. Για το κυλινδρικό καλούπι (προθέρμανση στους 745 ^{o}C) διαπίστωσαν ότι ο ΣΜΘ μεταβάλλεται γραμμικά από 200 $W/m^2 \cdot K$ σε θερμοκρασία τηγμένου μετάλλου 1300 ^{o}C, έως 100 $W/m^2 \cdot K$ σε θερμοκρασία τηγμένου μετάλλου 850 ^{o}C. Για το καλούπι σε σχήμα πλάκας, ο ΣΜΘ μεταβάλλεται απο 5000 $W/m^2 \cdot K$ για θερμοκρασία τήγματος 1400 ^{o}C, έως 100 $W/m^2 \cdot K$ για θερμοκρασία τήγματος 1100 ^{o}C.

1. Η σωστή τοποθέτηση των θερμοστοιχείων καθορίζει την ακρίβεια των μετρήσεων.
2. Ανακρίβεια στη μέτρηση του ΣΜΘ μεταξύ καλουπιού/ατμόσφαιρας h_{ext} έχει επιπτώσεις στον υπολογισμό του διεπιφανειακού ΣΜΘ, αλλά το αντίστροφο πρόβλημα διατηρεί την ορθότητα του.

Οι ***Lewis και Ransing*** προτείνουν ότι από πειραματικά δεδομένα για χυτά που παράγονται από καθαρό αλουμίνιο μέσω της χύτευσης βαρύτητας, ο διεπιφανειακός ΣΜΘ μπορεί να παίρνει τιμές *από* ***500 έως 16.000*** $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$. Οι συντελεστές αυτοί είναι μεγάλης σημασίας για την αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας της στερεοποίησης . Ο πειραματικός προσδιορισμός της διακύμανσης των τιμών του ΣΜΘ ως προς το χρόνο, έχει υπολογιστεί εκ νέου ώστε να δείξει τον τρόπο διακύμανσης του σε σχέση με τη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια. Αυτή η διακύμανση παρατηρήθηκε να είναι εκθετικού χαρακτήρα. Επίσης, το μοντέλο αυτής της διακύμανσης βρέθηκε να είναι παρόμοιο σε όλα τα πειραματικά αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε ότι όλες αυτές οι μορφές της διακύμανσης του ΣΜΘ, μπορεί να απεικονισθούν από μια μοναδική εξίσωση που μπορεί να μοντελοποιήσει τον IHTC μεταξύ μετάλλου-καλουπιού. Το πλεονέκτημα αυτής της συσχέτισης είναι η ικανότητά του να προσεγγίσει με αυτό το μοντέλο τις συνδυασμένες επιπτώσεις της γεωμετρίας, της μόνωσης, της επένδυσης, του σχηματισμού του κενού κλπ κατά τη διάρκεια της αριθμητικής προσομοίωσης και να χρησημοποιηθεί στο βέλτιστο σχεδιασμό του ΣΜΘ στη διεπιφάνεια μετάλλου καλουπιού.

Οι Schmidt and Svensson ανέλυσαν επίσης το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού και υποστήριξαν τις απόψεις τους με πειράματα. Πρότειναν ότι η μεταβολή του ΣΜΘ με τον χρόνο , μπορεί να γίνει σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο κρατάει όσο το μέταλλο είναι ακόμα υγρό, και εώς ότου απομακρυνθεί η θερμότητα υπερθέρμανσης. Σε αυτό το στάδιο υπάρχει πολλή καλή επαφή μεταξύ τηγμένου μετάλλου-καλουπιού. Ο ΣΜΘ σε αυτό το στάδιο, εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του καλουπιού, και στην περίπτωση επενδυσης, εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού της.

Στο δεύτερο στάδιο, μετά την απομάκρυνση της θερμότητας υπερθέρμανσης ο ΣΜΘ αρχίζει να μειώνεται. Αυτό οφείλεται σε μερική στερεοποίηση και σε βαθμιαία ελάττωση της επαφής μεταξύ μετάλλου καλουπιού. Συμφωνα πάντα με τους Schmidt and Svensson ένα κενό , μακροσκοπικά ορατό, σχηματίζεται μόνο κατά το τρίτο στάδιο, που εμφανίζεται κατά το τέλος της στερεοποίησης όπου η στερεοποιημένη επιφάνεια έχει ενισχυθεί τόσο ώστε να αντιστέκεται στη μεταλλοστατική πίεση (πίεση που αναπτύσσεται σε έναν όγκο τηγμένου μετάλλου και που είναι υπεύθυνη για την κίνηση του μέσα στο καλούπι.).

Το τρίτο στάδιο ξεκινά κατά το σχηματισμό του κενού. Πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων με διαφορετικές παραμέτρους χύτευσης. Το συμπέρασμα ήταν ότι το μακροσπικό κενό αέρος δε σχηματίζεται παρά μόνο όταν η επιφάνεια του χυτού είναι πλήρως στερεοποιημένη (δηλ, ποσοστό στερεοποίησης τουλάχιστο 0.9), μείωση όμως του ΣΜΘ συμβαίνει ήδη από την ημιστερεά κατάσταση.

Γενικά οι ακόλουθοι παράγοντες επηρεάζουν το ΣΜΘ:

i. *Πάχος επένδυσης*: Αύξηση στο πάχος, συντελεί σε μείωση στην αρχική τιμή του ΣΜΘ.

ii. *Μονωτικά στρώματα, μεταλλικές επενδύσεις*: Η μόνωση θα μειώσει την αρχική τιμή του ΣΜΘ, ενώ μια μεταλλική επένδυση (chill) θα την αυξήσει.

iii. *Γεωμετρία χυτού*: Σε περιοχές όπου είναι πιο πιθανό να σχηματιστεί το κενό αέρος ο ΣΜΘ θα είναι μικρότερος, δηλ,σ το κάτω μέρος του χυτούο ΣΜΘ θα παίρνει μεγαλύτερες αρχικές τιμές εν συγκρίσει με το υπόλοιπο χυτό.

iv. *Θερμοκρασία έγχυσης*: Αύξηση της θερμότητας υπερθέρμανσης συντελεί σε αύξηση του ΣΜΘ.

v. *Τραχύτητα της επιφάνειας του καλουπιού*: λείες επιφάνειες δίνουν καλύτερη επαφή τηγμένου μετάλλου και τύπουμε απότελεσμα μεγάλυτερη αρχική τιμή του ΣΜΘ σ’αυτή την περίπτωση.

vi. *Σύσταση κράματος*: Κράματα με μεγαλύτερη freezing range ($T_l - T_s$) θα έχουν μεγάλυτερη αρχική τιμή ΣΜΘ.

vii. *Μεταλλοστατική πίεση*: Αύξηση της οδηγεί σε αύξηση του ΣΜΘ.

viii. *Θερμοκρασία καλουπιού*: Μεγαλύτερη θερμοκρασία καλουπιού οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια του πρώτου σταδιου και σε διάφορες τιμές του ΣΜΘ.

Στην αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας της χύτευσης, οι επόμενες πέντε μέθοδοι προσεγγίζουν τη μεντελοποίηση του ΣΜΘ.

i. *Χρήση ενός σταθερού ΣΜΘ κατά την ανάλυση της στερεοποίησης*

ii. *Υπόθεση μια γραμμικής ή εκθετικής μείωσης του ΣΜΘ σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του χυτού στη διεπιφάνεια*

iii. *Μοντελοποίηση του κενού αρθμητικά και προσδιορισμός του ΣΜΘ*

iv. *Μοντελοποίηση του κενού βάσει της γεωμετρίας και της μέσης θερμοκρασίας κοντά στο στερεοποιημένο μέταλλο, μόνο με θερμική αγωγή.*

v. *Χρήση πειραματικά καθορισμένων ΣΜΘ συναρτήσει του χρόνου.*

Στην περίπτωση ενός σταθερού ΣΜΘ δύο τιμές έχουν κυριαρχήσει. Μιά σταθερή τιμή από 2500 $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ έως 5000 $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ πριν από το σχηματισμό του κενού και μια τιμή 400 $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ μετά το σχηματισμό του.

Οι Tadayon and Lewis πρότειναν έναν ΣΜΘ λαμβάνοντας υπόψη το μεταλλοστατικό μέτωπο. Έγινε η υπόθεση ότι ο ΣΜΘ μεταβάλλεται γραμμικά με το μέτωπο αυτο.

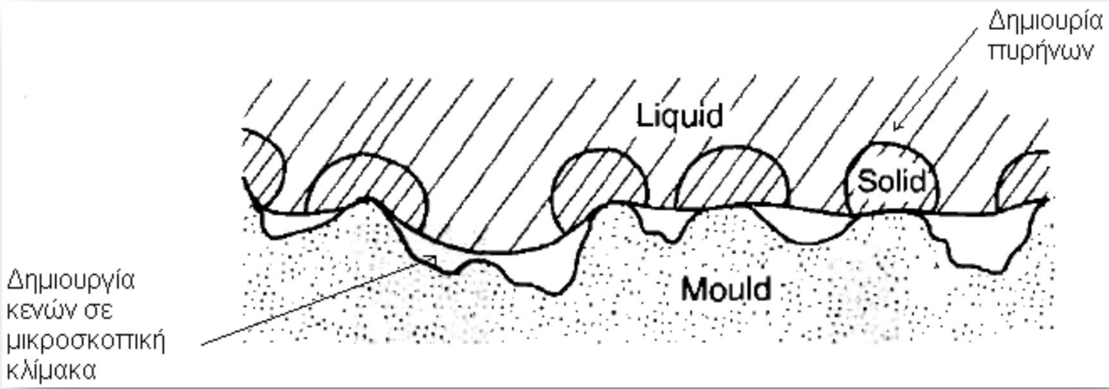
Οι Stefanescu et al. υπέθεσαν μια εκθετική μεταβολή του ΣΜΘ συναρτήσει της θερμοκρασίας. [10]

$$h = a \cdot e^{b \cdot T}$$

όπου a, b αυθαίρετες μεταβλητές.

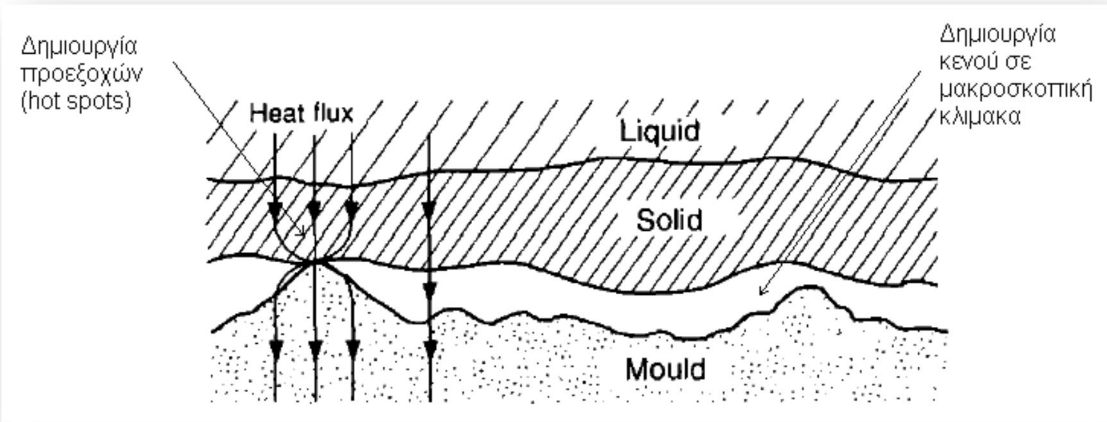
Οι συγγραφείς Ho και Pehlke από το Πανεπιστήμιο του Michigan ήταν οι πρώτοι που ερεύνησαν διεξοδικά το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά τη στερεοποίηση των μετάλλων. Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία της έρευνάς τους.

Καθώς το ρευστό μέταλλο εισέρχεται αρχικά στο καλούπι η μακροσκοπική επαφή τους είναι ικανοποιητική, χάρη στη ικανότητα του υγρού μετάλλου να ακολουθεί τη γεωμετρία της κοιλότητας του χυτού. Κενά υπάρχουν μόνο σε μικροκλίμακα, δημιουργούνται δε ανάμεσα στα σημεία που αργούν περισσότερο να στερεοποιηθούν, πως φαίνεται και στο σχήμα 1.22. Στα σημεία αυτά, η αρχικά πολύ μεγάλη ροή θερμότητας προκαλεί τη δημιουργία πυρήνων στο μέταλλο, με επακόλουθο την τοπική υπόψυξη. Το στερεοποιημένο αυτό στρώμα στη συνέχεια διαδίδεται ώστε να καλύψει τη μεγαλύτερη επιφάνεια του χυτού. Στη συνέχεια, λόγω της συρρίκνωσης, χάνεται η αρχικά καλή επαφή μεταξύ μετάλλου και καλουπιού, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεταξύ τους κενά. Επαφή υπάρχει μόνο σε μερικά σημεία που προεξέχουν περισσότερο, στα σημεία δηλαδή που στερεοποιούνται τελευταία (hot spots). Κατά συνέπεια, η μετάδοση θερμότητας γίνεται με διαφορετικό μηχανισμό σε κάθε περίπτωση, με αγωγή στα προεξέχοντα σημεία και με συναγωγή στα κενά.



Σχήμα 2.5: Δημιουργία κενών σε μικροσκοπική κλίμακα.

Μετά τη δημιουργία ενός στερεοποιημένου στρώματος επαρκούς αντοχής, επιπλέον κινήσεις τόσο από το καλούπι όσο και από το χυτό πρόκειται να χαλάσουν την καλή αυτή επαφή, έτσι ώστε τα σημεία επαφής να απέχουν αρκετά μεταξύ τους και να είναι τυχαία κατανεμημένα στο χώρο. [11]



Σχήμα 2.6: Δημιουργία κενών σε μικροσκοπική κλίμακα εξαιτίας της τραχύτητας στην επιφάνεια του καλουπιού.

Η συνολική μετάδοση θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού και καλουπιού μπορεί να γραφεί σαν άθροισμα τριών συνιστωσών:

$$h = h_s + h_c + h_r$$

Όπου:

- h_s είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ των στερεών επαφών στα σημεία που προεξέχουν **(αγωγή)**

Ø h_c είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μέσω του αέρα στις περιοχές που υπάρχουν κενά **(συναγωγή)**

Ø h_r είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας **(ακτινοβολία)**

Οι Ho και Pehlke έχουν βρει αναλυτικές εκφράσεις για κάθε μια από τις παραπάνω συνιστώσες της συνολικής ροής θερμότητας. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται ως εξής:

1. Όταν κατά την είσοδο του ρευστού μετάλλου η επαφή μετάλλου-καλουπιού είναι αρκετά ικανοποιητική, η μετάδοση θερμότητας γίνεται κυρίως με αγωγή, στα σημείο που έρχονται σε επαφή. Αν μάλιστα στην περιοχή αυτή η επαφή ενισχυθεί από επιβαλλόμενη πίεση, τότε οι τιμές του Σ.Μ.Θ. είναι τόσο μεγάλες, ώστε σε χύτευση υψηλών πιέσεων αλουμινίου ο συντελεστής ξεπερνά τα 60.000 $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$.

   Οι υψηλές αυτές τιμές γρήγορα πέφτουν με τη σταδιακή στερεοποίηση και συρρίκνωση του μετάλλου, με αποτέλεσμα το μέταλλο να χάνει την πολύ καλή επαφή του με τα τοιχώματα του καλουπιού. Κατά συνέπεια, η τιμή του συντελεστή στην περιοχή αυτή πέφτει στα 100 με 1000 $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$.

2. Όταν θα αρχίσει να δημιουργείται το μακροσκοπικό κενό στη διεπιφάνεια καλουπιού και μετάλλου, κατά την εξέλιξη της στερεοποίησης, η μετάδοση θερμότητας μέσω των σημείων που έρχονται σε επαφή είναι πλέον αμελητέα.
3. Μετά τη μείωση της επαφής Μετά τη μείωση της επαφής και κατά συνέπεια της μετάδοσης θερμότητας από το μέταλλο στο καλούπι, ο βασικός μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας είναι πλέον μέσω του αέρα που βρίσκεται στο κενό που έχει δημιουργηθεί στη διεπιφάνεια. Ο συντελεστής hc υπολογίζεται πλέον από την παρακάτω σχέση:

$$h_c = \frac{k}{d}$$

όπου:

k = η θερμική αγωγιμότητα του αέρα που περιέχεται στο κενό

d = το πάχος του κενού [11]

Αυτό σημαίνει ότι στο χρονικό αυτό διάστημα ο Σ.Μ.Θ. εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις διαστάσεις του κενού που έχει δημιουργηθεί. Στην περίπτωση των ελαφρών μετάλλων, σύμφωνα με τους Ho και Pehlke, πάντα, η συνεισφορά της ακτινοβολίας στη μετάδοση θερμότητας είναι πολύ μικρή (περίπου 1%) κι έτσι μπορεί να αμεληθεί για τις συγκεκριμένες θερμοκρασίες που μελετάμε. Σύμφωνα με τη μελέτη του F.Lau, το μέγεθος του κενού που δημιουργείται καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το χρόνο, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το είδος του μετάλλου χύτευσης, την κατάσταση του τύπου, τη γεωμετρία του χυτού και άλλες παραμέτρους διαδικασίας. Στη μελέτη του εξηγεί το παρακάτω διάγραμμα, στο οποίο διακρίνονται και οι 3 περιοχές του συντελεστή. Στο ***στάδιο I,*** η τιμή του συντελεστή είναι έντονα αυξανόμενη, ***στο στάδιο II***, η τιμή του παραμένει σταθερή και τέλος, ***στο στάδιο III***, η τιμή του είτε αυξάνεται, λόγω αύξησης στη πίεση επαφής στη διεπιφάνεια, είτε μειώνεται λόγω της αύξησης του κενού μεταξύ καλουπιού και μετάλλου. Το σίγουρο είναι ότι στο τελευταίο αυτό στάδιο η τάση του συντελεστή ποικίλει έντονα για διαφορετικές χυτεύσεις, ενώ στα προηγούμενα 2 στάδια η εικόνα δε μεταβάλλεται.

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε πως οι διάφορες τιμές που παίρνει ο *HTC* ανάλογα με την πάροδο του χρόνου μπορούν να διακριθούν σε (3) στάδια:

– Στάδιο 1ο: είναι αυτό κατά το οποίο το μέταλλο παραμένει στην υγρή φάση και ο HTC h_I μειώνεται γρήγορα από μια υψηλή αρχική τιμή σύμφωνα με την εξίσωση:

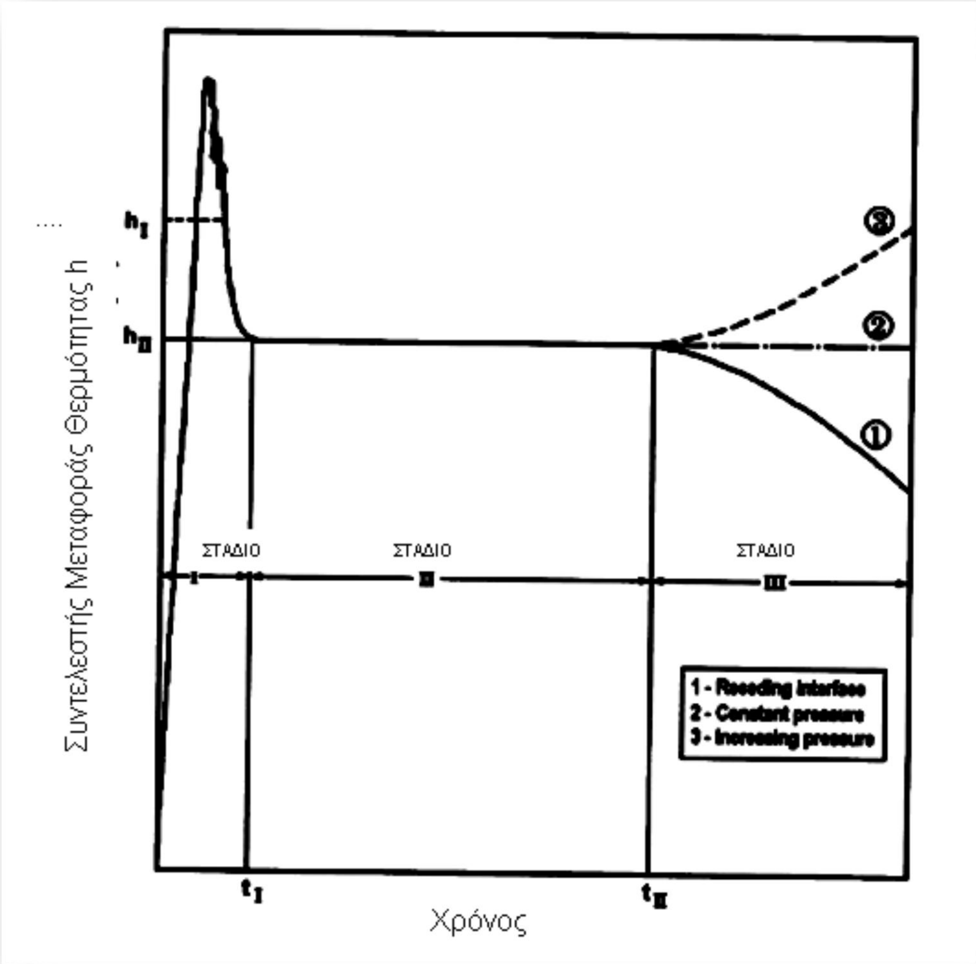
$$h = C \cdot (t)^{-n}$$

όπου η σταθερά C εξαρτάται από τη από τη σύνθεση του κράματος, το υλικό του καλουπιού και την υψηλή θερμοκρασία (superheat).

– Στάδιο 2ο: Ξεκινάει όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τη liquidus γραμμή και ο *HTC* h_{II} έχει μια σταθερή τιμή.

– Στάδιο 3ο: Η τιμή του *HTC* h_{III} είτε αυξάνεται εξαιτίας μιας αύξησης της πίεσης επαφής (contact pressure) είτε μειώνεται εξαιτίας της αύξησης του διάκενου μεταξύ χυτού-καλουπιού. Εναλλακτικά ο *HTC* παραμένει σταθερός εάν η πίεση επαφής παραμένει σταθερή.

Διαγραμματικά τα παραπάνω απεικονίζονται ως εξής: [11]



Σχήμα 2.7: Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στναρτήσει του χρόνου σύμφωνα με τους Ho – Pelhke

Βιβλιογραφία

[01] Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability (Editor and John Green (Dec 1, 2007))

[02] Aluminum alloy castings - Properties processes and applications (J. Gilbert Kaufman and Elwin L. Rooy (Dec 1, 2004))

[03] Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow (R. W. Lewis, Perumal Nithiarasu and Kankanhalli Seetharamu)

[04] Theory of Heat Transfer with Forced convection Film Flows (Deyi Shang)

[05] Principles of Solidification - An Introduction to Modern Casting and Crystal Growth Concepts (M. E. Glicksman)

[06] Castings (MAFS. John Campbell)

[07] A correlation to describe Interfacial Heat Transfer during Solidification Simulation and its use in the Optimal feeding Design of castings. [R.W Lewis and R.S Ransing]

[08] Selection of Initial Mold–Metal IHTC Values in Casting Simulations – A Sensitivity Analysis (Ramesh K. Nayak and Suresh Sundarraj)

[09] Interface Heat transfer in Investment Casting of Aluminum Alloys (David J. Browne and Denis O' Mahoney)

[10] Determination of IHTC during investment casting process of single crystal blades. (Y.Dong, Kun Bu, Y.Dou, D.Zhang)

[11] Metal – Mold interfacial Heat Transfer (K. Ho – R. Pelhke)

Κεφαλαιο 3ο

Πειραματικη διαδικασια

Φυγοκεντρικη χυτοπρεσα

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την πειραματική διαδικασία είναι φυγοκεντρική και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

Εικόνα 3.1: Η μηχανή φυγοκεντρικής χύτευσης.

Στο σχήμα διακρίνονται τα εξής μέρη:

A: Κύρια μονάδα ελέγχου

B: Μοχλός ασφάλισης- απασφάλισης φυγοκεντριζόμενου καλουπιού

C: Διακόπτης ελέγχου ποσοστού ισχύος της αντίστασης του σκεύους τήξης

D: Ένδειξη ισχύος

Εικόνα 3.2: Ο θάλαμος της χυτόπρεσσας με την υποδοχή για το καλούπι και τοποθετημένο αντιδιαμετρικά ακριβώς το αντίβαρο

Επίσης εξαιτίας της απουσίας εποπτικού μέσου για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του τήγματος στο σκεύος τήξης, χρησιμοποιήσαμε πυρόμετρο.

Η μηχανή φυγοκεντρικής χύτευσης:

Το καλούπι στερεώνεται στην ειδική ημικυκλική υποδοχή και μπροστά του υπάρχει το σκεύος τήξης με την οπή για την απόχυση του τήγματος.

Το σκεύος τήξης είναι κατασκευασμένο από κεραμικό υλικό και είναι κατάλληλο για την τήξη πλατίνας αφού η αντοχή του ξεπερνά τους 2000°C. Η κίνηση της μηχανής οφείλεται στον ηλεκτρικό κινητήρα της SIEMENS τύπου 1LA 7073-4ABB10 με τα εξής χαρακτηριστικά:

Συχνότητα	50Hz	60Hz
Ισχύς	0.37kW / 1.05 A	0.43kW / 1.02 A
Σ.Ι	cosφ=0.78 à 1370RPM 220-240V/ 380-420 V Δ/Y 1,89-1,87/ (1,09-1,08)A	cosφ=0.76 à 1670RPM 440-480V Y (1,08-1,09)A à S.F=1.1

Πίνακας 3. 1: Τα χαρακτηριστικά στοιχεία της φυγοκεντρικής χύτευσης

Η πρωτεύουσα τροχαλία που βρίσκεται στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα, έχει διάμετρο d=60 mm και η δευτερεύουσα που βρίσκεται στον κεντρικό άξονα περιστροφής της μηχανής έχει διάμετρο D=207 mm. Παράγεται έτσι λόγος μείωσης 1:3.5. που στα 50Hz λειτουργίας αντιστοιχούν σε περίπου 391 rpm του κεντρικού άξονα και στα 60Hz περίπου 477 rpm. Η συχνότητα λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα, η ταχύτητα περιστροφής, η ισχύς του και πλήθος ακόμα στοιχείων εμφανίζονται και ελέγχονται από την μονάδα ελέγχου SIEMENS Sinamics G100CP110AIN. Επίσης η μηχανή διαθέτει ποτενσιόμετρα για τη ρύθμιση της ισχύος της και του χρόνου περιστροφής. Η ψύξη της γίνεται με συνεχή κυκλοφορία νερού, η σωστή λειτουργία του οποίου εμφανίζεται σε αντίστοιχη λυχνία. Η τήξη του μετάλλου πραγματοποιείται με επαγωγικό τρόπο μέσω πηνίου περιμετρικά του σκεύους τήξης. Έτσι δεν είναι δυνατή η έναρξη της τήξης αν δεν υπάρχει μέταλλο που θα λειτουργήσει σαν δευτερεύον πηνίο, μέσα στο σκεύος. Ακόμα η μηχανή διαθέτει τις απαραίτητες διατάξεις ασφάλειας και καπάκι που λειτουργεί με χρονοκαθυστέρηση και δεν ανοίγει αν δεν ακινητοποιηθεί πλήρως το περιστρεφόμενο καλούπι.

Να σημειώσουμε πως αρχικά η χυτόπρεσα δεν ήταν δυνατό να υποδεχθεί θερμοστοιχεία που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση των πειραμάτων μας. Έτσι ήταν αναγκαία η τροποποίησή της, που περιλαμβάνει διάνοιξη οπής στον κεντρικό άξονα και τοποθέτηση αναμονής, με καλώδια που περιστρέφονται με κατάλληλο μηχανισμό στη βάση του άξονα.

Τέλος έγινε βαθμονόμηση (καλιμπράρισμα) της πρέσας, τόσο για το χρόνο λειτουργίας της όσο και για την απορροφούμενη ισχύ της, αφού οι ενδείξεις στα ποτενσιόμετρα δεν εμφανίζουν απόλυτα νούμερα αλλά ποσοστά των ονομαστικών μεγεθών.

Έτσι έχουμε:

i. Για το χρόνο λειτουργίας:

Ένδειξη Ποτενσιομέτρου	Χρόνος λειτουργίας (sec)
1	50
2	110
3	160
4	200
5	260

Πίνακας 3. 2: Ο χρόνος λειτουργίας της μηχανής ανάλογα με την ένδειξη του ποτενσιόμετρου.

ii. Για το ρεύμα λειτουργίας:

Ένδειξη Ποτενσιομέτρου	Απορροφούμενη ένταση ρεύματος (A)
500	3.4
600	4.2
700	4.8
900	6.2
1000	9.3

Πίνακας 3. 3: Το ρεύμα λειτουργίας της μηχανής ανάλογα με την ένδειξη της οθόνης.

iii. Για τις στροφές του ηλεκτροκινητήρα:

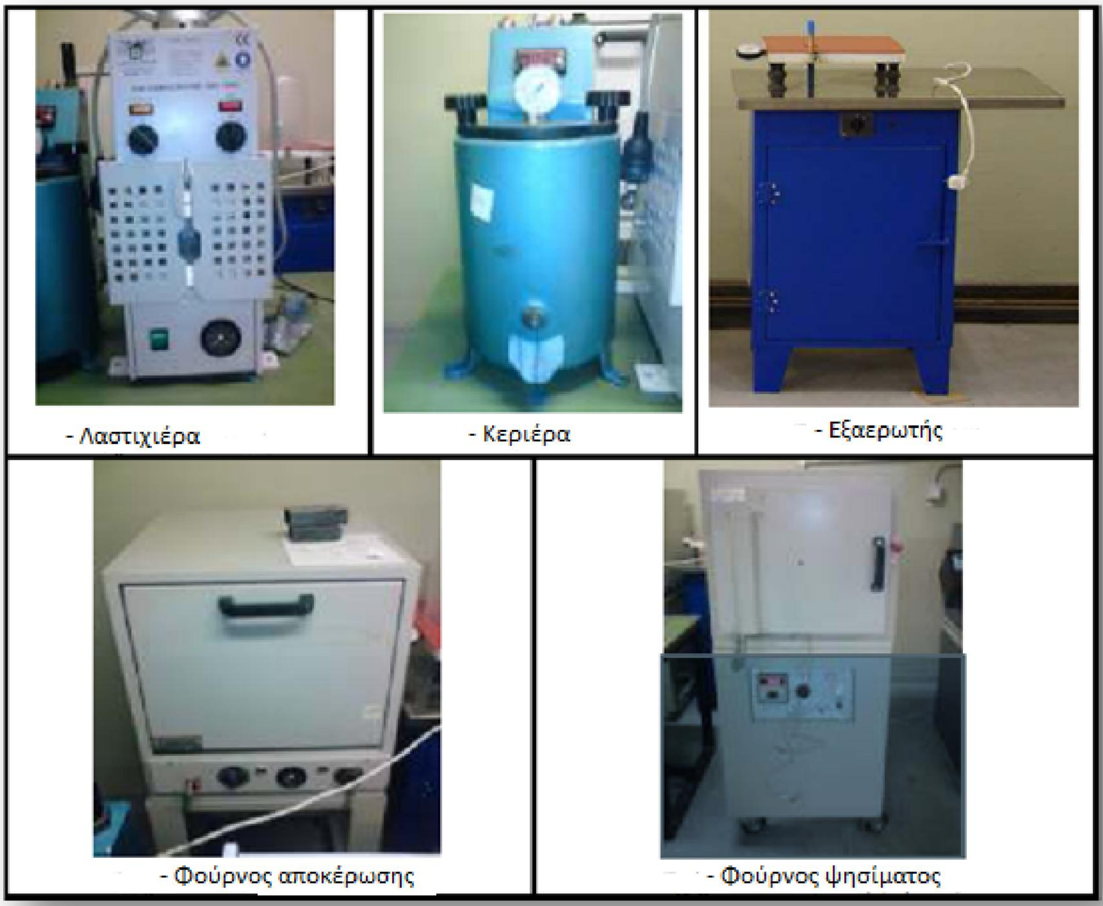
Ένδειξη Ποτενσιομέτρου	Συχνότητα λειτουργίας (Hz)	Στροφές (R.P.M)
0	0	0
1	1.00	8
2	10.00	81
3	20.00	152
4	27.00	214
5	35.00	271
6	43.00	340
7	53.00	415
8	60.00	469

Πίνακας 3. 4: Στροφές ηλεκτροκινητήρα.

ΆΛΛΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΥΤΕΥΣΗ

Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της χύτευσης είναι τα εξής:

- Λαστιχιέρα
- Κεριέρα
- Εξαερωτής
- Αποκερωτής
- Φούρνος ψησίματος



Εικόνα 3.3 : Μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη χύτευση

Επίσης, κατά τη διαδικασία της χύτευσης χρησιμοποιήθηκαν και τα παρακάτω βοηθητικά εξαρτήματα:

- *Φλάσκα με λαστιχένια βάση και προστατευτικό κολλάρο*
- *Κοπίδι*
- *Κόφτης*
- *Μπολ ανάμιξης και αναμικτήρας*
- *Ηλεκτρικό κολλητήρι*

Σχήμα 3.4: Μπολ ανάμιξης και αναμικτήρας

Σχήμα 3.5: Η φλάσκα και η λαστιχένια βάση

Σχήμα3.6 : Το κοπίδι, ο κόφτης και το ψαλίδι

Σχήμα 3.7: Το κολλητήρι

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ PROCAST

Το Procast είναι ένα λογισμικό που αναπτύσσεται τα τελευταία 20 χρόνια περίπου και χρησιμοποιεί τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων για τη μοντελοποίηση διαδικασιών χύτευσης και των φαινομένων που τις συνοδεύουν. Πιο συγκεκριμένα είναι δυνατή η προσομοίωση του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας, της ροής του ρευστού, του τρόπου πλήρωσης το καλουπιού καθώς και στοιχείων της μικροδομής του χυτού, όπως το πορώδες και οι εσωτερικές τάσεις. Η δομή του προγράμματος βασίζεται γύρω από ένα κύριο διαχειριστή, ο οποίος περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποπρογράμματα (modules) :

- MeshCast: όπου δημιουργείται η γεωμετρία του μοντέλου
- PreCast: στο οποίο προσθέτουμε στο μοντέλο, το είδος των υλικών, τις
- οριακές και συνοριακές συνθήκες
- DataCast: όπου ελέγχεται συνολικά το μοντέλο
- ProCast: στο οποίο γίνεται η επεξεργασία
- ViewCast: απεικονίζει και εξετάζει τα αποτελέσματα

MESHCAST

Στο module αυτό γίνεται ορισμός της γεωμετρίας του αντικειμένου που θέλουμε να χυτεύσουμε καθώς και το καλούπι του. Είναι δυνατή η σχεδίαση του με τις εντολές που παρέχει το πρόγραμμα αλλά και η εισαγωγή του κατάλληλου αρχείου που προέρχεται από κάποιο CAD λογισμικό (CATIA, AUTOCAD κτλ). Σε εφαρμογές απλής γεωμετρίας συνηθίζεται η σχεδίαση τους στο MeshCast ενώ για πιο σύνθετες μορφές η σχεδίαση πρέπει να γίνεται σε κατάλληλα προγράμματα και να εισάγονται στο MeshCast για διορθώσεις και πλεγματοποίηση. Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο ελέγχεται για την ύπαρξη σφαλμάτων, το πλήθος των σχηματισμένων επιφανειών και ακμών, ανάλογα με την προκαθορισμένη ακρίβεια. Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα ορίζονται τα επιφανειακά πλέγματα με την επιθυμητή πυκνότητα καθώς και τα ογκικά πλέγματα σε άλλη λειτουργία του MeshCast. Να σημειώσουμε πως ο αριθμός των τετράεδρων που ορίζουν ένα πλέγμα δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλος καθώς επηρεάζει την ταχύτητα και την ακρίβεια των υπολογισμών.

PRECAST

Στο υποπρόγραμμα PreCast ορίζουμε τα υλικά αντικειμένου και καλουπιού, τις αρχικές συνθήκες, τις οριακές συνθήκες και τις παραμέτρους τρεξίματος. Όλα αυτά τα στοιχεία προέρχονται από τις βάσεις δεδομένων του PROCAST και οφείλονται στην καταγραφή των αποτελεσμάτων πειραματικών διαδικασιών. Η διαδικασία της προ-επεξεργασίας έχει ως εξής: Αρχικά γίνεται επανέλεγχος της γεωμετρίας του μοντέλου και ορίζουμε το κατάλληλο υλικό για το χυτό (χάλυβας, αλουμίνιο, μπρούντζος κτλ) και το καλούπι (άμμος, γύψος κτλ). Κάθε υλικό που επιλέγουμε από τη βάση δεδομένων προσδιορίζεται αναλυτικά με πίνακες και μεγέθη για τις θερμικές, χημικές και μηχανικές του ιδιότητες. Επιπλέον μπορεί ο χρήστης να ορίσει νέο υλικό με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Μετά ακολουθεί ο ορισμός του διανύσματος βαρύτητας σε οποιονδήποτε από τους τρεις άξονες και η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών, όπως πίεση χυτού, καλουπιού, διεπιφάνειας, θερμοκρασία. Έπειτα καθορίζουμε τις παραμέτρους τρεξίματος οι οποίες καθορίζουν το συνολικό χρόνο προσομοίωσης, τον αριθμό των βημάτων, τον υπολογισμό πορώδους καθώς και τον τρόπο πλήρωσης του καλουπιού και τον τρόπο επίλυσης του ροϊκού προβλήματος. Αφού καθορίσουμε όλα τα παραπάνω ανοίγουμε το DataCast.

DATACAST

Σκοπός του DataCast είναι η συνολική επισκόπηση του μοντέλου, ο εκτεταμένος έλεγχος σφαλμάτων και η μετατροπή όλων των μονάδων στο πρότυπο CGS. Κατά την εκτέλεση του, εμφανίζει στο παράθυρο ελέγχου την πιθανή ύπαρξη ελαττωμάτων, τα οποία πρέπει να διορθωθούν για να συνεχιστεί η προσομοίωση. Μια ακόμα λειτουργία του DataCast είναι η δημιουργία αρχείων που περιέχουν την περίληψη του προβλήματος και τη γεωμετρία με τις ιδιότητες του μοντέλου.

PROCAST

Στο module του ProCast γίνονται όλοι οι υπολογισμοί της διαδικασίας της προσομοίωσης, σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουμε ορίσει στα προηγούμενα υποπρογράμματα. Επίσης γίνεται η επίλυση του θερμικού και ροϊκού προβλήματος και δημιουργούνται αρχεία αναγνωρίσιμα από το VIewCast. Στο παράθυρο ελέγχου που ανοίγεται φαίνεται αν «τρέχει» η διαδικασία και μόλις ολοκληρωθεί εμφανίζει το ανάλογο μήνυμα. Τέλος στο ProCast περιλαμβάνεται και το υποπρόγραμμα PostCast που επιτρέπει την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

VIEWCAST

Στο ViewCast πραγματοποιείται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται είτε με εικόνες, σταδιακά, ανάλογα με τον αριθμό των εκτελεσμένων βημάτων, είτε με γραφικές παραστάσεις. Οι υπολογισμοί αφορούν τα εξής:

- Τη θερμοκρασία
- Το ποσοστό στερεοποίησης
- Το χρόνο στερεοποίησης
- Το ποσοστό πορώδους
- Τη συνισταμένη ταχύτητα του ρευστού μετάλλου

STATUS

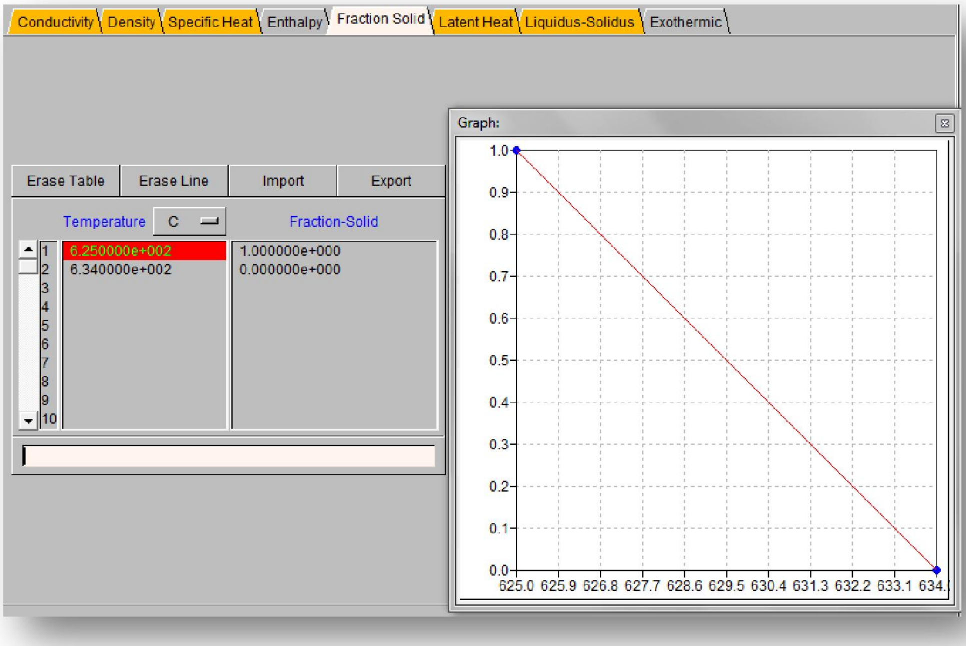
Τέλος στον manager του PROCAST διακρίνουμε το module Status, το οποίο εμφανίζει την εξέλιξη της διαδικασίας, το χρόνο και τον αριθμό των βημάτων.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ PROCAST

Για να υπάρχει πλήρης ομοιότητα στις παραμέτρους που σχετίζονται με το υλικό, των προσομοιώσεων με τις πειραματικές καμπύλες, παραμετροποιήσαμε στο ProCAST 2004.1 το αλουμίνιο, έτσι ώστε να έχει ιδιότητες ίδιες με αυτές που προέκυψαν από την εκτέλεση των πειραμάτων. Επιλέγεται έτσι το πλησιέστερο υλικό & τροποποιείται ως προς τις Liquidus – Solidus.

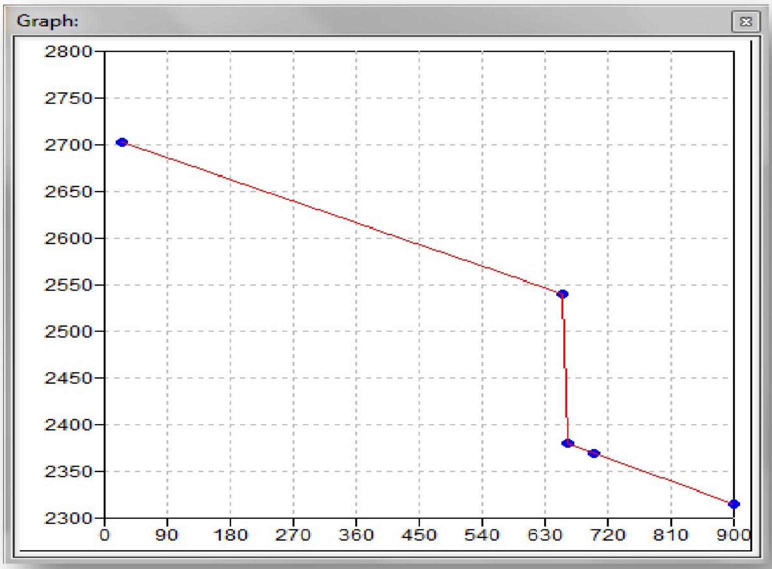
Οι θερμικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου όπως αυτές δίνονται μέσα από το πρόγραμμα προσομοίωσης Procast 2004.1 είναι σχηματικά:

i. Fraction solid (Ποσοστό στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας)



Σχήμα 3.8: Ποσοστό στερεοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

ii. Πυκνότητα καθαρού αλουμινίου συναρτήσει της θερμοκρασίας

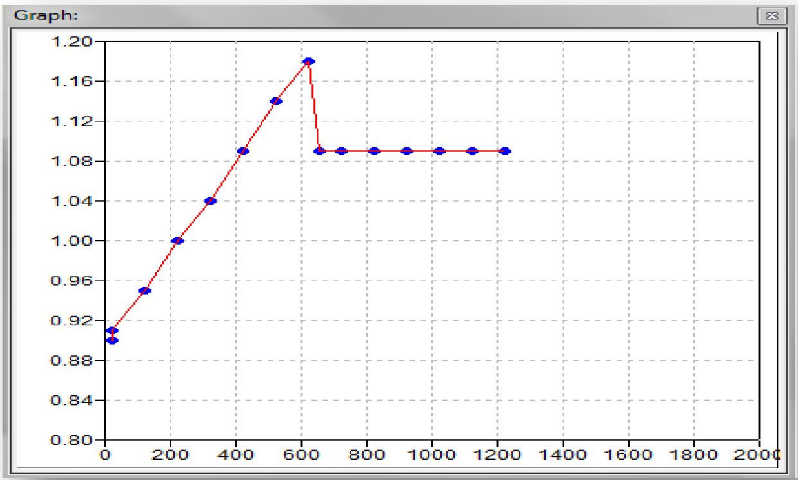


Σχήμα 3.9:Πυκνότητα καθαρού αλουμινίου συναρτήσει της θερμοκρασίας

iii. Θερμοκρασίες liquidus και solidus (οι τιμές τους είναι σταθερές).

Liquidus	634 ° C
Solidus	625 ° C

iv. Ειδική Θερμότητα του καθαρού μετάλλου συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.10. Ειδική θερμότητα αλουμινίου συναρτήσει της θερμοκρασίας

ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

Ο γύψος αποτελεί ένα διαδεδομένο υλικό, γνωστό για τις πυρρίμαχες και θερμονωτικές του ιδιότητες. Για το συγκερκιμένο είδος που χρησιμοποιήθηκε της εταιρίας Ransom &Randolph, τύπου Argentum Jewelry Investment, δεν υπάρχουν δεδομένες συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες, αλλά από γύψο σε γύψο αυτές δεν πρέπει να αλλάζουν πολύ. Τα συστατικά του και οι ιδιότητες που παρέχονται από την εταιρεία φαίνονται παρακάτω.

Chemical Name (Ingredients)	CAS #	%	TLV mg/m^3	OSHA PEL mg/m^3
Silica (quartz)	14808-60-7	<50	0.05** 10.0**	0.10* 0.30**
Silica (cristobalite)	14464-46-1	<50	0.05* 5.0**	0.05* 0.15**
Calcium Sulfate	7778-18-9	<50	10.0**	5.0* 15.0**
			* Respirable Dust **Total Dust	

Σχήμα 3.11. Τα συστατικά του γύψου τύπου Argentum

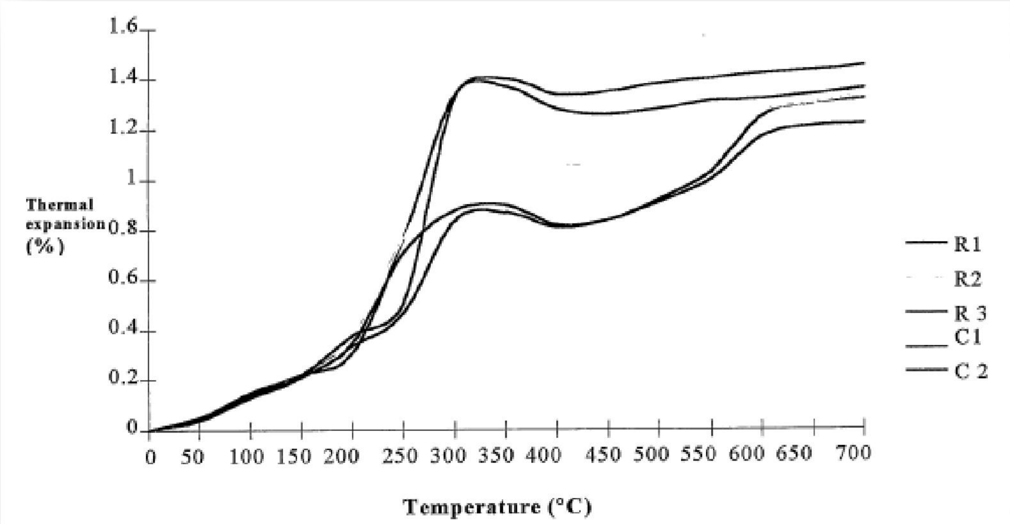
Boiling Point	N/A	**Specific Gravity**	2.5
Vapor Pressure	N/A	**pH**	6-8
Vapor Density	N/A	**Evaporation Rate**	N/A
Critical Temperature	N/A	**Viscosity**	N/A
Decomposition Temperature	N/A	**% Volatile by Volume**	None
Melting/Freezing Point	N/A	**Magnetism**	N/A
Solubility in Water	1.5% by wt.	**Autoignition Temperature**	N/A
Critical Pressure	N/A	**Corrosion Rate**	N/A
Permeable Exposure Limit	N/A	**Molecular Weight**	Mixture
Appearance and Odor	White powder, no odor		

Σχήμα 3.12. Ιδιότητες του γύψου τύπου Argentum

Στη βιβλιοθήκη υλικών του ProCast υπάρχει και γύψος και δίδονται οι παρακάτω θερμικές ιδιότητες :

- Θερμική αγωγιμότητα: 0.2637 W/mK
- Πυκνότητα: 1100 kg/m^3
- Ειδική θερμοχωρητικότητα: 0.83736 kJ/kgK

Μία ιδιότητα που χρησιμεύει στη μελέτη είναι και ο συντελεστής θερμικής διαστολής ο οποίος εντοπίστηκε για ονομασία υλικού “plaster” ίσος προς $16.4 \cdot 10^{-6}$ m/mK, τιμή κοντά σε αυτή του αλπακά όπως φαίνεται παραπάνω. Δε γίνεται να εξακριβωθεί κατά πόσον θερμική διαστολή συντελείται σε θερμοκρασίες τόσο υψηλές ή η διαστολή αποδίδεται σε μικρότερες θερμοκρασίες. Από σχετική εργασία [14] εντοπίστηκε για κάποια είδη γύψου το παρακάτω διάγραμμα που ίσως συνηγορεί ότι ο γύψος παραμένει μη διαστελλόμενος κατά τη διαδικασία αυτής καθ'αυτής της χύτευσης καθώς η θερμοκρασία του κινείται πάνω από τους 600 ^oC. Συνολικά στο εύρος 0 – 900 ^oC προφανώς και υπάρχει συστολή κατά περίπου 1.6%.



Σχήμα 3. 13:Θερμική διαστολή για 5 είδη γύψου

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

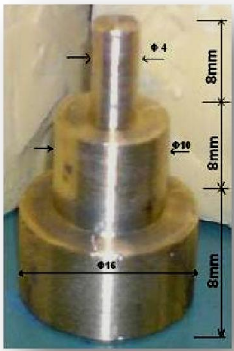
Η πειραματική διαδικασία θα παρουσιαστεί σε σαφή βήματα που θα περιγράφουν τις ενέργειες που ακολουθούνται, για ευκολότερη κατανόηση ακόμα και του άπειρου αναγνώστη που έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με το αντικείμενο.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για να ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία πρέπει να έχουμε καταλήξει στο σχήμα, το μέγεθος και προφανώς το υλικό που θα εξετάσουμε. Το δοκίμιο δε γίνεται να προσαρμοστεί απευθείας στη λαστιχένια βάση της φλάσκας γι' αυτό με κάποιο τρόπο πρέπει να επιτευχθεί η σύνδεση των δύο μερών (δοκιμίου – βάσης φλάσκας). Αυτός είναι ένας πρακτικός λόγος που εξηγεί την ύπαρξη του κορμού. Πολύ περισσότερο σε χυτεύσεις με πολύκλωνα δέντρα, όπου παίρνουμε παραπάνω από ένα χυτά, ο κορμός είναι πολύ σημαντικός και οι διαστάσεις του πρέπει να υπολογίζονται πολύ προσεκτικά, αφού αποτελεί τον αγωγό μέσω του οποίου διοχετεύεται το τήγμα σε όλο το καλούπι. Επομένως η χρησιμότητα του κορμού έγκειται στην εξασφάλιση εύροιας και μην αμελούμε ότι εκεί έχουμε συγκέντρωση πολλών ατελειών κατά τη στερεοποίηση, οπότε αν δεν υπήρχε αυτός θα παρουσιάζονταν οι ατέλειες σε αυτό καθ'αυτό το χυτό που κατασκευάζουμε.

Ανάλογα με τη μελέτη που κάνουμε, το μήκος του κορμού μπορεί να διαφέρει και επειδή με τη συστολή του λιωμένου κεριού μπορεί να μην επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος κορμού, καλό είναι το δοκίμιο να μην φτιάχνεται με προσαρτημένο τον κορμό, ώστε αν χρειαστεί αυτός περαιτέρω επεξεργασία να γίνεται πιο εύκολα.

Εν προκειμένω το δοκίμιο που επιλέχθηκε ήταν κυλινδρικό με τρεις κυκλικές διατομές διαφορετικών διαμέτρων όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.19.



Σχήμα 3.14: Η γεωμετρία του δοκιμιου

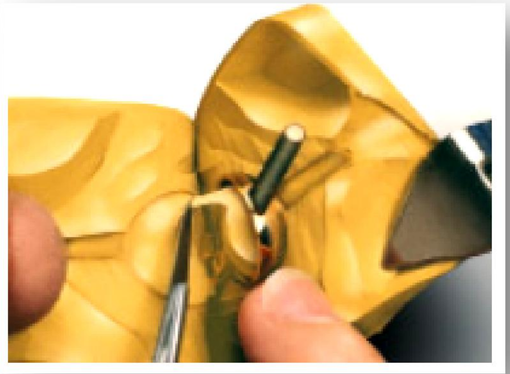
Η κατασκευή του είναι σχετικά απλή. Με τη χρήση του τόρνου διαμορφώνουμε κλιμακωτά τις τρείς διαμέτρους σε ίσα μήκη.

Προφανώς το δοκίμιο αυτό δε χρειάζεται να είναι κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό το οποίο θα μελετήσουμε. Συνήθως είναι από κάποιο μαλακό σχετικά μέταλλο ώστε να είναι πιο εύκολο στη διαμόρφωση.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΛΑΣΤΙΧΟΥ – ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΓΙΑ ΚΕΡΙΝΑ

ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Υπάρχουν τυποποιημένα κομμάτια ειδικού λάστιχου για την κατασκευή καλουπιών για κέρινα ομοιώματα. Λαμβάνουμε το διαμορφωμένο δοκίμιο και το τοποθετούμε ανάμεσα σε δύο παραλληλεπίπεδα κομμάτια λάστιχου. Στη συνέχεια τα τοποθετούμε ανάμεσα στα φύλλα της λαστιχιέρας (μοιάζει στον τρόπο λειτουργίας με τοστιέρα) τα οποία ζεσταίνονται με ηλεκτρικές αντιστάσεις. Με την πίεση που επιβάλλεται, αλλά και με την αύξηση της θερμοκρασίας, το λάστιχο λιώνει ελαφρώς στη διεπιφάνεια των δύο κομματιών, όπου αυτά εφάπτονται, και περιβάλλει πλήρως το δοκίμιο με αποτέλεσμα να παίρνουμε ένα συμπαγές κομμάτι λάστιχου μετά την ολοκλήρωση του ψησίματος. Έχουμε φροντίσει να έχουμε και μια δίοδο εισαγωγής του κεριού. Αν όχι τη διαμορφώνουμε στη συνέχεια μετά το ψήσιμο, αλλά είναι πιο δύσκολο. Τέλος για να χρησιμοποιήσουμε το καλούπι του ομοιώματος πρέπει να το καταστήσουμε διαιρέτο πραγματοποιώντας μία τομή. Συνήθως την τομή αυτή την κάνουμε έτσι ώστε εσκεμμένα να υπάρχουν συγκεκριμένες ανωμαλίες στα δύο μέρη, ώστε να είμαστε σίγουροι για την καλή επαφή τους κατά τη δημιουργία των κέρινων ομοιωμάτων.



Σχήμα3.15 : Διαίρεση καλουπιού ομοιώματος

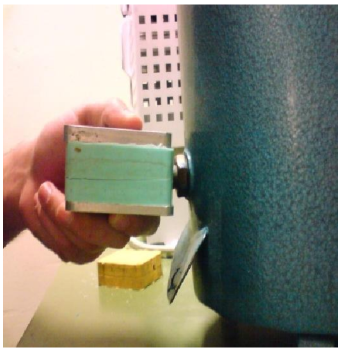
Δημιουργια κερινων ομοιωματων

Προτού ξεκινήσουμε τη δημιουργία κέρινων ομοιωμάτων πρέπει να καθαρίσουμε την εσωτερική επιφάνεια του διαιρετού ελαστικού καλουπιού, ώστε τα κέρινα ομοιώματα να προκύπτουν με όσο το δυνατόν λιγότερες ανωμαλίες από τυχόν ακαθαρσίες που μπορεί να υπάρχουν. Ο καθαρισμός γίνεται με ειδικό σπρέυ το οποίο εφαρμόζουμε επί της εσωτερικής επιφάνειας και το αφήνουμε να στεγνώσει. Έτσι εξασφαλίζεται λεία επιφάνεια, επιτυγχάνεται διευκόλυνση ροής και ευκολία αποκόλλησης του ομοιώματος.

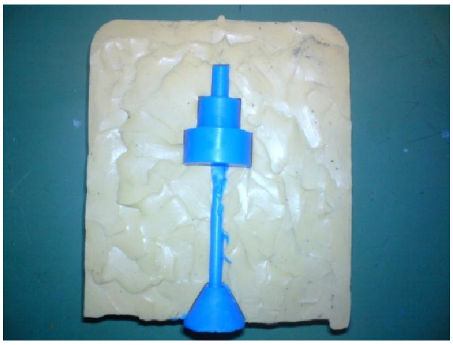
Προχωρώντας στη διαδικασία ανάβουμε την κεριέρα και περιμένουμε να λιώσει καλά το κερί. Η θερμοκρασία που ήταν ρυθμισμένη η κεριέρα ήταν περίπου στους 95°C. Επίσης στο λέβητα-θάλαμο της κεριέρας επιβάλλαμε πίεση περί τα 0,4bar με εξωτερικό έμβολο που έχει ενσωματωμένο η κεριέρα από κατασκευής.

Ύστερα από περίπου 30 λεπτά που το λιώσιμο έχει ολοκληρωθεί, παίρνουμε το ελαστικό καλούπι, το τοποθετούμε ανάμεσα σε δύο μεταλλικά πλακίδια, ώστε όπως το κρατάμε να ασκείται ομοιόμορφη πίεση στις εξωτερικές επιφάνειες και να μην παραμορφώνεται τοπικά το εσωτερικό σχήμα του καλουπιού, και με προσοχή εφαρμόζουμε τη δίοδο που έχουμε δημιουργήσει για την είσοδο του κεριού στη βαλβίδα της κεριέρας. Ασκώντας πίεση σε αυτή, απελευθερώνεται κερί και ρέει εντός του καλουπιού. Καλό είναι να μην πιέζουμε το καλούπι όταν εγχύεται το κερί διότι παγιδεύεται εντός του καλουπιού ο αέρας, αποτρέποντας το κερί να καταλάβει τον όλο χώρο. Είναι σημαντικό να δημιουργούμε οπή για τη διαφυγή του αέρα από κάποιο σημείο του καλουπιού προς το περιβάλλον, που θα λειτουργεί σαν υπερχείλιση, αλλά είναι μάλλον δύσκολη η διαμόρφωσή της.

Αφήνουμε για λίγο το καλούπι με το λιωμένο κερί ώστε αυτό να κρυώσει και στη συνέχεια ανοίγουμε το καλούπι και παίρνουμε το κέρινο ομοίωμα.



Σχήμα3.15 : Έγχυση κεριού στο λαστιχένιο καλούπι

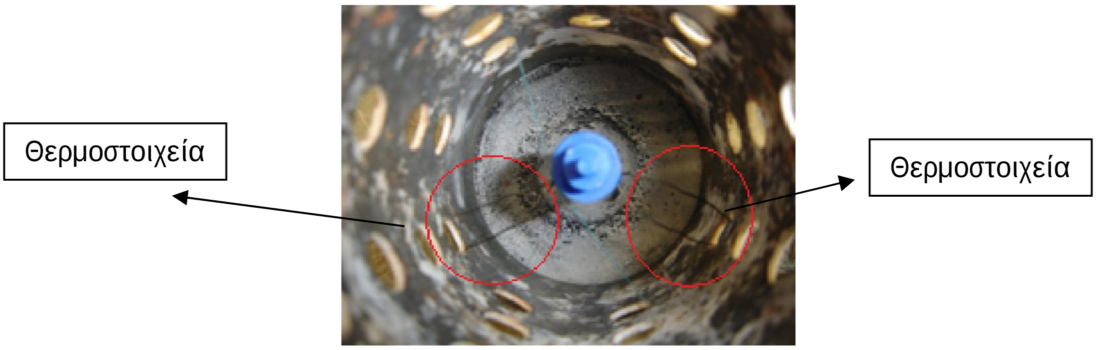


Σχήμα 3.16: Παραγωγή κέρινου ομοιώματος

Επεξεργασια κερινου ομοιωματος –Τοποθετηση θερμοστοιχειων

Έχουμε μορφοποιήσει τη διάμετρο και το μήκος του κορμού που θα τοποθετήσουμε και πλέον πρέπει να γίνει η σύνδεση με το ομοίωμα. Λιώνουμε τοπικά με κολλητήρι το ομοίωμα ή την άκρη του κορμού και με γρήγορη κίνηση, που πρέπει να είναι και σχετικά ακριβής, κολλάμε τα δύο μέρη φέρνοντας στην ίδια ευθεία τα κέντρα τους.

Τέλος θα τοποθετήσουμε τα θερμοστοιχεία. Παίρνουμε θερμοστοιχείο του οποίου τα άκρα των μετάλλων-δεκτών έχουν κολληθεί με μικροφλόγα. Θερμαίνουμε με αναπτήρα το ακραίο σημείο, όπου είναι και η σύνδεση και πάλι με γρήγορη κίνηση το ακουμπάμε πιέζοντας ελαφρά στο σημείο του ομοιώματος όπου θέλουμε να γίνει μέτρηση της θερμοκρασίας. Προφανώς όσα σημεία μελετάμε τόσα θερμοστοιχεία χρειαζόμαστε. Τα θερμοστοιχεία που τοποθετούνται στο εσωτερικό του γύψου πρέπει να είναι καλά στερεωμένα ώστε με την έγχυση του γύψου να μη μετακινηθούν. Στη χυτόπρεσσα του εργαστηρίου μπορούμε να κάνουμε μέχρι και τρείς μετρήσεις σημείων.



Σχήμα 3.17: Τα θερμοστοιχεία εκατέρωθεν της διεπιφάνειας

Για τη μεταφορά της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα ενός θερμοστοιχείου υπάρχουν ειδικά καλώδια προσαρμοσμένα σταθερά πάνω στο θάλαμο χύτευσης, στα οποία συνδέουμε τα άκρα του θερμοστοιχείου. Έτσι το ένα ζεύγος άκρων βρίσκεται εντός του θαλάμου και το άλλο εκτός και αυτό το δεύτερο συνδέεται στη συσκευή που παίρνει τις μετρήσεις. Η συσκευή αυτή ενισχύει και στη συνέχεια μετατρέπει την τάση που δέχεται στην ανάλογη διαφορά θερμοκρασίας. Πρέπει να σιγουρευθούμε ότι οι συνδέσεις έχουν γίνει με σωστή πολικότητα και πρέπει να δείχνει αρχικά το όργανο από όπου παρακολουθούμε τις θερμοκρασίες, περίπου τη θερμοκρασία καλουπιού εκείνη τη χρονική στιγμή. Αν δεν έχουν γίνει σωστά οι συνδέσεις το όργανο μας δείχνει μηδενική ή προφανώς λανθασμένη θερμοκρασία.

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ – ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΥΦΛΟΥ

ΜΕ ΓΥΨΟ

Το καλούπι στα πειράματα που έγιναν ήταν από γύψο όπως προαναφέραμε. Τοποθετούμε το δοκίμιο στη λαστιχένια βάση της φλάσκας εισάγοντας τον κορμό στην ειδική υποδοχή. Εφαρμόζουμε το μεταλλικό περιφερειακό κομμάτι της φλάσκας στη λαστιχένια βάση και από τις τρύπες εξάγουμε τα άκρα των θερμοστοιχείων και πλέον ο κενός χώρος θα πληρωθεί με γύψο.

Ο γύψος φτιάχνεται αναμιγνύοντας τα υλικά νερό και γύψο σε σκόνη στην κατάλληλη αναλογία. Συγκεκριμένα για τη φλάσκα που χρησιμοποιήθηκε απαιτούνται :

228ml νερού - 583gr γύψος

Αναδεύουμε καλά τα υλικά μέχρι να δημιουργηθεί ένα ελαφρώς παχύρρευστο και ομοιογενές μίγμα. Επειδή ακριβώς το μίγμα είναι παχύρρευστο υπάρχει πιθανότητα να ενυπάρχουν μετά την ανάδευση παγιδευμένες φυσαλλίδες αέρα και γι'αυτό κάνουμε **απαέρωση** σε ειδική συσκευή, τον απαερωτή. Ο απαερωτής δημιουργώντας μικρού βαθμού κενό εξαναγκάζει τις φυσαλλίδες να έλθουν στην επιφάνεια και να εκτονωθούν.

Για να συγκρατήσουμε το γύψο να μη ρεύσει από τις υπάρχουσες τρύπες της φλάσκας τυλίγουμε όσο γίνεται με μεγαλύτερη στεγανότητα την περιφέρειά της με χοντρό χαρτί και τότε εγχύουμε το γύψο. Ο γύψος στερεοποιείται πλήρως σε περίπου 90 λεπτά, αλλά δεν είναι απόλυτα σαφές αυτό.

ΑΠΟΚΕΡΩΣΗ - ΨΗΣΙΜΟ

Τοποθετούμε τη φλάσκα-καλούπι στον αποκερωτή, ο οποίος είναι ένα είδος φούρνου με ειδικά διαμορφωμένη βάση για να ρεύσει το κερί. Το ρυθμίζουμε σε θερμοκρασία της τάξης των 200 ^oC, και αφήνουμε τη φλάσκα τοποθετημένη αντίστροφα απ'ό,τι στη διαδικασία χύτευσης για 90 λεπτά. Το κερί κάποια στιγμή λιώνει και το μεγαλύτερο μέρος αυτού, αφού ρεύσει στο κάτω μέρος του θαλάμου θέρμανσης, εξατμίζεται.

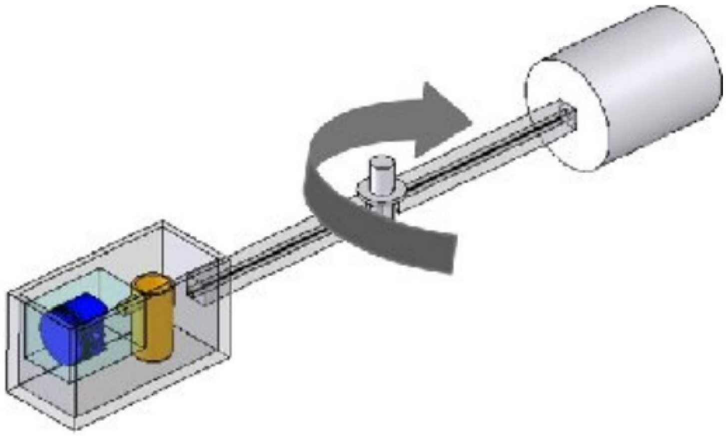
Μετά το πέρας της θέρμανσης στον αποκερωτή τοποθετούμε τη φλάσκα σε ειδικό φούρνο υψηλών θερμοκρασιών όπου ψήνεται για 6 ώρες στην οριακή θερμοκρασία των 550 °C. Το ψήσιμο κατ'αυτό το χρονικό διάστημα ισχυροποιεί το γύψο, καθιστώντας τον όσο σκληρότερο γίνεται, καθώς θα εισχωρήσει σε αυτόν υλικό ακόμα υψηλότερης θερμοκρασίας. Σε καμία περίπτωση δε θερμαίνουμε το γύψο σε μεγαλύτερη θερμόκρασία, διότι μπορεί αυτός εσωτερικά να καταρρεύσει.

Σχήμα 3.18: Το ψήσιμο του γύψου στον ειδικό φούρνο (σε μέση θερμοκρασία 550 °C .)

ΤΗΞΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ

Το λιώσιμο του μετάλλου είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντας για την επιτυχία της χύτευσης. Για να εξασφαλιστεί η επαρκής ροή του στις κοιλότητες του καλουπιού πρέπει να είναι σε θερμοκρασία υψηλότερη της liquidus τόσο ώστε να προλάβει να φτάσει στα πιο απομακρυσμένα σημεία πριν στερεοποιηθεί. Ωστόσο πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία τήξης (υπέρτηξη) οδηγεί σε πληθώρα ελαττωμάτων στα χυτά, όπως πόρους, συρρίκνωση, κακή εμφάνιση κτλ.

Για να γίνει η έναρξη της τήξης οδηγούμε χειροκίνητα το σκεύος πάνω από το πηνίο και ανασηκώνουμε τον ειδικό μοχλό που το ασφαλίζει σταθερά. Έπειτα κλείνουμε το συρόμενο καπάκι της μηχανής και από το άνοιγμα που διαθέτει παρατηρούμε την πορεία της τήξης. Μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία, απασφαλίζουμε το σκεύος τήξης το οποίο πλησιάζει τη φούσκα του καλουπιού μπροστά από τον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας και η διαδικασία της χύτευσης ξεκινά αυτόματα. Έχοντας καθορίσει στην αρχή της χύτευσης το χρόνο και την ταχύτητα περιστροφής, ξεκινά η διαδικασία και μέσω των αναπτυσσόμενων φυγόκεντρων δυνάμεων αποχέεται το τήγμα από το σκεύος τήξης στο καλούπι. Αφού ολοκληρωθεί η φυγοκέντριση περιμένουμε μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να απασφαλίσει το καπάκι και βγάζουμε τη φλάσκα.. Να σημειώσουμε πως κατά την περιστροφή του καλουπιού προκαλούνται δονήσεις στη μηχανή που πιθανό να επηρεάσουν το αποτέλεσμα και για αυτό απαιτείται το ζύγισμα του περιστρεφόμενου βραχίονα για την εξάλειψή τους. Το ζύγισμα επιτυγχάνεται ξεβιδώνοντας το σημείο στήριξης του βραχίονα του καλουπιού στον κεντρικό άξονα, ώστε να ταλαντεύεται ελεύθερα, και μετατοπίζοντας το περιστρεφόμενο βάρος αντιδιαμετρικά του καλουπιού. Μόλις γίνει η εξισορρόπηση, ασφαλίζουμε πάλι το σημείο στήριξης.



Σχήμα 3.19: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού περιστροφής της φυγοκεντρικής πρέσσας.

ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΤΟΥ ΓΥΨΟΥ

Η απομάκρυνση του γύψου γίνεται με εμβάπτιση του μούφλου σε νερό που βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία του μούφλου όταν αυτό βγει από τη χυτόπρεσσα, στα περισσότερα πειράματα, είναι 450 με 500˚C, ενώ του νερού 20˚ C, με αποτέλεσμα ο γύψος να παθαίνει **θερμικό σοκ** και να απομακρύνεται γρήγορα από το χυτό. Η εμβάπτιση του μούφλου δεν θα πρέπει να γίνεται αμέσως μετά την έγχυση του μετάλλου, διότι αυτό θα προκαλέσει ψαθυροποίηση του χυτού. Ο χρόνος που χρειάζεται για να προβλεφθεί το παραπάνω είναι περίπου 10 λεπτά.

Σχήμα 3.20: Εμβάπτιση του μούφλου σε νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τελικη παραλαβη χυτων

Η παραλαβή των χυτών περιλαμβάνει την αποκοπή τους από το δέντρο χύτευσης και την επιφανειακή τους κατεργασία. Η αποκοπή έγινε με χρήση του ειδικού κοπτικού μηχανήματος. Η επιφανειακή επεξεργασία περιλαμβάνει το βούρτσισμα των χυτών σε ηλεκτρικό τροχό, με βούρτσες διαφόρων σκληροτήτων. Έτσι απομακρύνονται τα υπολείμματα γύψου και οξειδίων από την επιφάνεια του μετάλλου. Για την πρόσδοση λάμψης στο χυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδικό διάλυμα λεύκανσης χυτών. Η επιφανειακή κατεργασία δεν θα πρέπει να γίνει σε υπερβολικό βαθμό, γιατί αυτό θα οδηγήσει σε απώλεια υλικού.

Σχήμα 3.21: Το χυτό πριν και μετά την επιφανειακή κατεργασία.

Λήψη τιμών θερμοκρασίας με χρήση θερμοστοιχείων

Για τη λήψη των πειραματικών καμπύλων απόψυξης χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου Κ, που τοποθετούνταν κατά τη δημιουργία του κέρινου ομοιώματος με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνουν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, τιμές θερμοκρασιών στη διεπιφάνεια καλουπιού και μετάλλου. Στην παράγραφο αυτή, δίνονται κάποιες εισαγωγικές έννοιες που αφορούν τη λειτουργία και χρήση των θερμοστοιχείων.

Το θερμοστοιχείο αποτελεί τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο στην πράξη μεταλλάκτη θερμότητας. Εκτός από μετρήσεις θερμοκρασίας σε πειραματικό επίπεδο, τα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούντα ευρέως στις μεταλλοβιομηχανίες για την επίβλεψη των θερμοκρασιών κατά την παρασκευή μετάλλων, καθώς και σε συσκευές πυρασφάλειας σε περίπτωση βλάβης του κεντρικού συστήματος πυρασφάλειας.

Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία των θερμοστοιχείων (thermocouples) βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck. Σύμφωνα με αυτό, όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα έλθουν σε επαφή, τότε, λόγω του διαφορετικού έργου εξόδου τους, ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από το μέταλλο με το μικρότερο έργο εξόδου προς το μέταλλο με το μεγαλύτερο έργο εξόδου, έστω και αν δεν εφαρμόζεται εξωτερική τάση σ' αυτά. Έτσι το πρώτο μέταλλο καθίσταται θετικότερο του δεύτερου με αποτέλεσμα στο σημείο επαφής να εμφανίζεται μια «τάση επαφής». Αν τώρα τα δύο ελεύθερα άκρα βρεθούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε αναπτύσσεται μια ΗΕΔ (ηλεκτρεγερτική δύναμη), της οποίας το μέγεθος εξαρτάται αφενός από το υλικό των δύο μεταλλικών αγωγών και αφετέρου από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο σημείο επαφής τους.

Η παραπάνω παρατήρηση του Seebeck φέρει και την ονομασία θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, η δε αναπτυσσόμενη ΗΕΔ ονομάζεται θερμοηλεκτρική τάση. Έχει καταστεί ήδη προφανές ότι αν μετρηθεί η θερμοηλεκτρική τάση που παράγεται από ζεύγος διαφορετικών μεταλλικών αγωγών, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του σημείου επαφής τους, τότε η επαφή αυτή μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, δεδομένου ότι ισχύει:

$$e_i = k(T) \cdot T_i$$

όπου:

e_i :η θερμοηλεκτρική τάση

$k(T)$:συνάρτηση εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και το ζεύγος μετάλλων των δύο αγωγών (δίνεται για κάθε περίπτωση σε μορφή πινάκων)

T_i : η θερμοκρασία στο σημείο επαφής

Για να μετρηθεί όμως η θερμοηλεκτρική τάση, η οποία παράγεται στο σημείο επαφής των δύο μεταλλικών αγωγών, θα πρέπει να συνδεθεί ένα βολτόμετρο.

Εξυπακούεται ότι το βολτόμετρο θα συνδεθεί μέσω επιπλέον μεταλλικών αγωγών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Έτσι, σχηματίζεται ένα «θερμοηλεκτρικό κύκλωμα».

Για την ανάλυση ενός θερμοηλεκτρικού κυκλώματος έχει διατυπωθεί κανόνας, στηριζόμενος ουσιαστικά στο δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, σύμφωνα με τον οποίο:

− Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται από θερμοηλεκτρικό κύκλωμα προκύπτει ως αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους θερμοηλεκτρικών τάσεων που αναπτύσσονται στα σημεία επαφής του κυκλώματος των αγωγών.

− Αν όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τότε η αναπτυσσόμενη από το θερμοηλεκτρικό κύκλωμα ΗΕΔ έχει τιμή ίση με 0.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ένδειξη e του βολτομέτρου, στο θερμοηλεκτρικό κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, θα ισούται με:

$$e = \left(e_{AB}\right)_{T_M} + \left(e_{B\Gamma}\right)_{T_R} + \left(e_{\Gamma A}\right)_{T_R} \quad (1)$$

όπου :

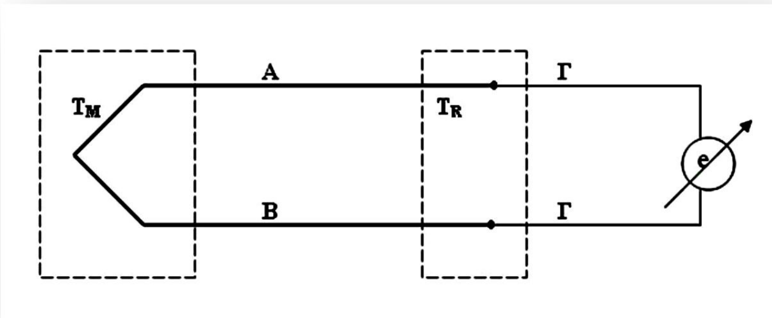
T_M η θερμοκρασία στο σημείο μετρήσεως, όπου τοποθετείται η επαφή των δύο αγωγών του θερμοστοιχείου (**Θερμοκρασία μετρήσεως**) T_R :η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται και οι δύο επαφές των αγωγών του θερμοστοιχείου με τους αγωγούς του μοναδικού τρίτου μετάλλου, με τους οποίους το θερμοστοιχείο συνδέεται με το όργανο μετρήσεως (**Θερμοκρασία αναφοράς**) Αν υποτεθεί ότι η ίδια θερμοκρασία (T_R) που επικρατεί στο σημείο αναφοράς, επικρατεί και στο σημείο μετρήσεως, δηλαδή όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία (T_R), τότε θα ισχύει:

$$\left(e_{AB}\right)_{T_R} + \left(e_{B\Gamma}\right)_{T_R} + \left(e_{\Gamma A}\right)_{T_R} = 0 \quad (2)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (2) παίρνουμε:

$$e = \left(e_{AB}\right)_{T_M} - \left(e_{AB}\right)_{T_R} \quad (3)$$

Δηλαδή, ένδειξη του βολτομέτρου ισούται με τη διαφορά των θερμοηλεκτρικών τάσεων, που παράγονται από το ζεύγος των αγωγών του θερμοστοιχείου, που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες του σημείου μετρήσεως και του σημείου αναφοράς.

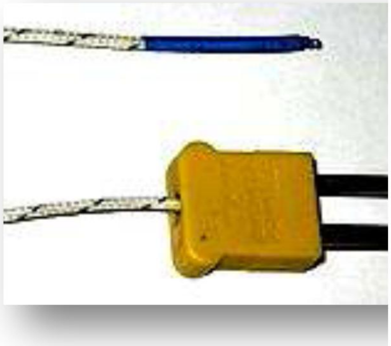


Σχήμα 3.22. : Σκαριφηματική Διάταξη λειτουργίας θερμοστοιχείου

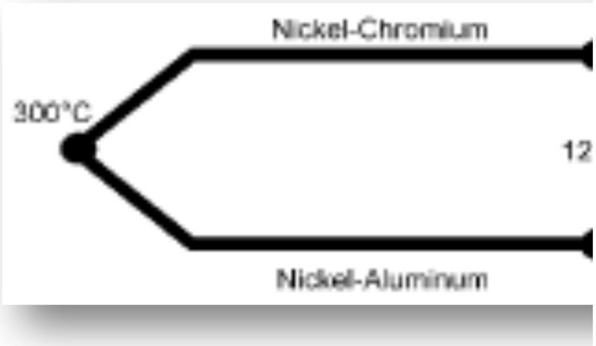
ΤΥΠΟΙ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην αγορά είναι διαθέσιμη μεγάλη ποικιλία θερμοστοιχείων για διάφορες μετρητικές εφαρμογές (E, J, N, B, R, K, S, T, C και M). Η επιλογή θερμοστοιχείου γίνεται συνήθως με βάση το θερμοκρασιακό εύρος της μέτρησης καθώς και την ακρίβεια που απαιτείται. Τα θερμοστοιχεία με μικρότερη ευαισθησία (π.χ. τύπου B, R και S) παρέχουν κατά αναλογία μικρότερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Άλλα κριτήρια επιλογής μπορεί να είναι, για παράδειγμα, το αν το υλικό τους είναι αδρανές ή μαγνητικό.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου Κ. Το θερμοστοιχείο τύπου K (chromel – alumel) είναι από τους πιο συνηθισμένους τύπους θερμοστοιχείων. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από χρώμιο, νικέλιο και αλουμίνιο. Είναι σχετικά φθηνά και διατίθενται σε ποικιλία ενώσεων των άκρων. Μπορούν να μετρήσουν θερμοκρασίες από -180 ως 1350˚C. Έχουν, όμως, ένα βασικό μειονέκτημα που είναι η μαγνητικότητα του νικελίου που επηρεάζει την ακρίβεια της μέτρησης κοντά στη θερμοκρασία Curie του υλικού. Για θερμοστοιχεία τύπου K αυτό συμβαίνει κοντά στους 150˚C. Η ευαισθησία αυτού του τύπου θερμοστοιχείων είναι περίπου 41 μV/C.



Σχήμα 3,23. : Θερμοστοιχείο τύπου K



Σχήμα 3.24 : Σκαρίφημα θερμοστοιχείου τύπου K

ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι δυσκολίες που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία (Zhi-peng κ.ά.) και διαπιστώθηκαν και στην πράξη είναι δύο.

- Είναι πολύ δύσκολο να υπολογισθεί η ακριβής απόσταση μεταξύ του σημείου στο οποίο μετριέται η θερμοκρασία και της διεπιφάνειας καλουπιού και μετάλλου.
- Είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί η σωστή τοποθέτηση του θερμοστοιχείου στο καλούπι.

Η παραπάνω αβεβαιότητα σχετικά μετά την τοποθεσία του θερμοστοιχείου μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά σφάλματα.

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΛΗΨΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η μέτρηση των θερμοκρασιών κατά την περίοδο απόψυξης του χυτού έγινε με τοποθέτηση θερμοστοιχείων τύπου Κ (βλ. προηγούμενη ενότητα), σε διάφορα σημεία του κέρινου ομοιώματος, στο στάδιο της συναρμολόγησης του δέντρου χύτευσης. Με τοπικό λιώσιμο του κεριού με τη βοήθεια του κολλητηρίου, ήταν δυνατή η ενσωμάτωση της άκρης του θερμοστοιχείου στο κέρινο ομοίωμα. Στη συνέχεια, τα θερμοστοιχεία ήταν μέσα στο καλούπι καθόλη τη διάρκεια αποκέρωσης και ψησίματος, ενώ κατά την προετοιμασία της χύτευσης συνδέονταν με τις ειδικές υποδοχές της μηχανής με κατάλληλες πυρίμαχες κλαίμες. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η μηχανή, επειδή έχει κατασκευαστεί για πειραματική χρήση, διαθέτει 3 υποδοχές για θερμοστοιχείο, δηλαδή είναι δυνατόν σε κάθε πείραμα να καταγραφούν 3 καμπύλες απόψυξης, καθεμία για διαφορετικό σημείο του χυτού. Η διαδικασία σύνδεσης απαιτεί πολύ μεγάλη προσοχή και ταχύτητα, ώστε τα θερμοστοιχεία να συνδεθούν με τη σωστή πολικότητα και να μην μειωθεί η θερμοκρασία καλουπιού παραπάνω από ότι έχει προβλεφθεί. Επειδή το σήμα που μεταδίδουν τα θερμοστοιχεία είναι αναλογικό, απαιτείται η χρήση μετατροπέα που παρεμβάλλεται μεταξύ θερμοστοιχείου και ηλεκτρονικού υπολογιστή και μετατρέπει το σήμα σε ψηφιακό. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν ίση με 25 μετρήσεις ανά sec. Επίσης, για την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε φορητός υπολογιστής που διέθετε το πρόγραμμα PDAQ VIEW, με τη βοήθεια του οποίου μεταφέρθηκαν τα δεδομένα στο Excel.

Σχήμα : Analog to digital μετατροπέας

Σχήμα : η ένδειξη του θερμοστοιχείου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{Ο}

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

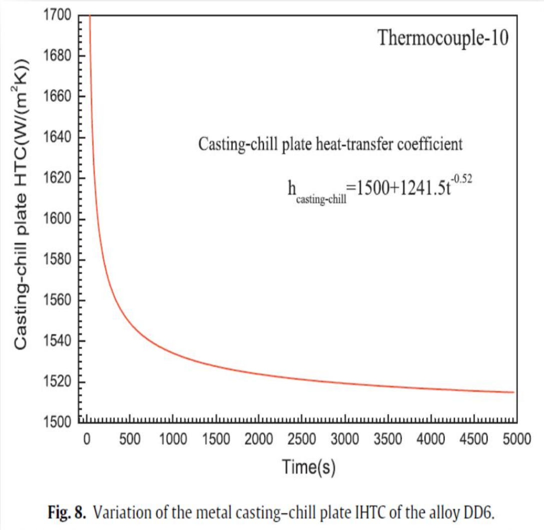
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ - ΠΟΡΕΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσεγγίσαμε το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με έναν μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων. Αν και η διαδικασία βασίστηκε στη μέθοδο δοκιμής και λάθους (trial and error), η προσέγγιση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είχε ως βάση αποτελέσματα που έχουν προκύψει από διεθνείς έρευνες πάνω στο Σ.Μ.Θ , σε διαφορετικά χυτά και είδη χύτευσης .

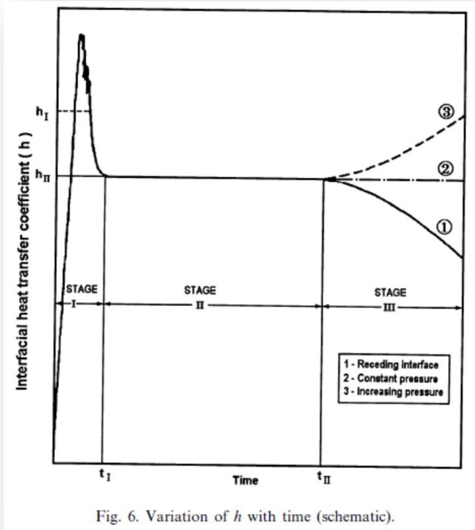
Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η διεξαγωγή πλήθους προσομοιώσεων για τον εντοπισμό του Σ.Μ.Θ. Τα inputs και τα outputs των προσομοιώσεων αυτών αποθηκεύονται συστηματικά, ώστε να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου, που θα χρησιμοποιείται για την αντικατάσταση της προσομοίωσης της χύτευσης, σε επαναληπτικές διαδικασίες προσδιορισμού του ΣΜΘ.

Γενικά, διακρίνουμε 4 στάδια μελέτης, με βάση 4 διαφορετικές προσεγγίσεις της μορφής του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (Σ.Μ.Θ.). Στο κάθε στάδιο, δοκιμάζεται μία διαφορετική μορφή του ΣΜΘ. Η μορφή του ΣΜΘ επιλέγεται με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, τη συνήθη πρακτική και τις δυνατότητες του λογισμικού προσομοίωσης.

Στο 1^{ο} στάδιο της μελέτης παραμετροποιήσαμε το Σ.Μ.Θ δίνοντας του *εκθετική μορφή*, ότι δηλ. μεταβάλλεται εκθετικά ως προς το χρόνο σύμφωνα με τη μορφή $htc = at^{-b} + c$, όπως περιγράφεται στις παρουσιάσεις των Dong et Al. Η μορφή του συντελεστή φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σύμφωνα με τους Dong et Al.



Εικόνα 2: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σύμφωνα με τους Lau et Al.

Στο 2ο στάδιο θεωρήσαμε ότι ο συντελεστής έχει μια σταθερή ενιαία τιμή σε όλο το δοκίμιο καθ'όλη τη διάρκεια της απόψυξης.

$$htc = c$$

Στο 3ο στάδιο της μελέτης θεωρήσαμε ότι ο ΣΜΘ είναι συνάρτηση του χρόνου και αποτελείται από 2 περιοχές :

$$htc = \begin{cases} f_1(t), & 0 < t < 100 \\ f_2(t), & 100 < t \end{cases}$$

Ο λόγος για την επιλογή αυτής της μορφής ΣΜΘ βασίζεται σε συνδυασμό των αποτελεσμάτων της μορφής του 1ου σταδίου και της μορφής που προτείνεται από τους Lau et al. (Εικόνα 2).

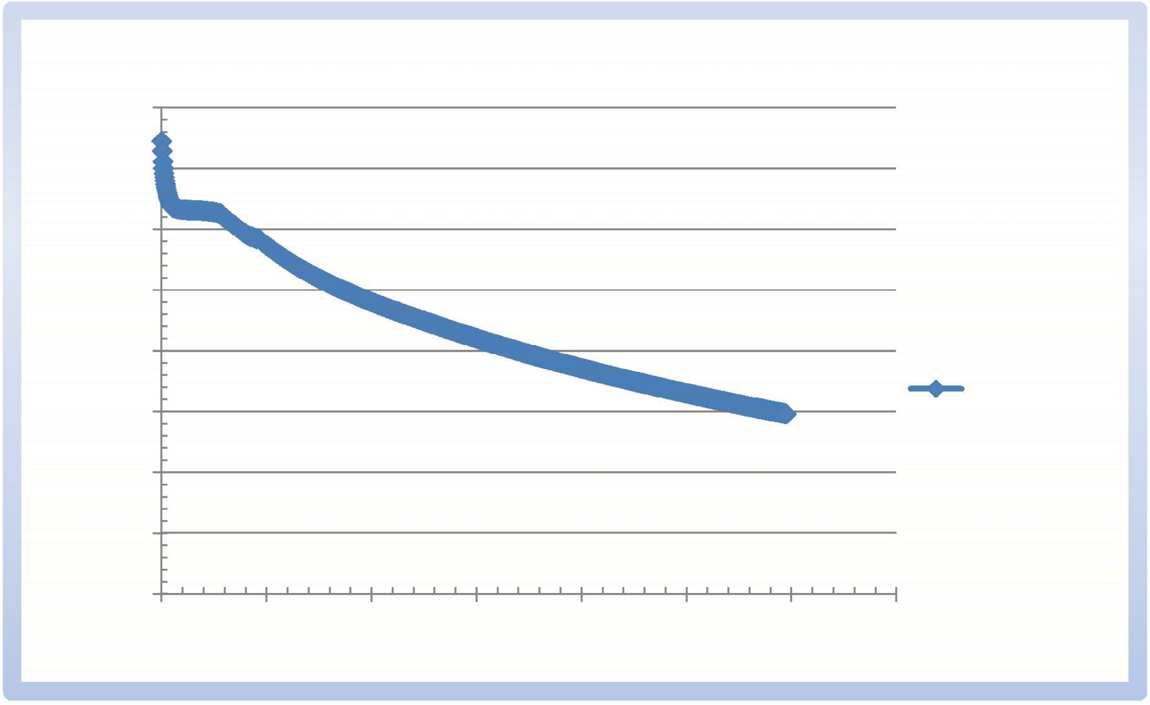
Τέλος , στο 4ο στάδιο , θεωρούμε ότι ο Σ.Μ.Θ *μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία*, ότι έχει δηλ. άλλη τιμή για θερμοκρασίες μετάλλου πάνω από τη Liquidus, άλλη τιμή ανάμεσα στη Liquidus και τη Solidus και άλλη τιμή κάτω από τη Solidus. Με άλλα λόγια, δίνεται από τη μορφή:

$$= (\ ) = \begin{cases} (1), & 640 < \\ (2), & 625 < \ < 640 \\ (3), & 625 < \end{cases}$$

Εξετάζουμε λοιπόν σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις τις καμπύλες απόψυξης των προσομοιώσεων συγκρίνοντας τις με την πειραματική καμπύλη απόψυξης πειράματος που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο.

ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΠΟΨΥΞΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Από τη χύτευση αλουμινίου που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο, η καμπύλη απόψυξης που προέκυψε φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 3: Πειραματική καμπύλη απόψυξης (Θερμοκρασίας – Χρόνου)

Από την καμπύλη απόψυξης διακρίνονται οι τρεις περιοχές:

0<t<##sec ή 634<T<749^{o}C : Άλουμίνιο σε υγρή μορφή (τήγμα)

##<t<##sec ή 625<T<634^{o}C : Αλουμίνιο υπό στερεοποίηση. (mushy zone)

##<t<1200sec ή T<625^{o}C : Στερεό αλουμίνιο. Απόψυξη.

Από τη μέτρηση θερμοκρασιών του πειράματος προκύπτει χρήσιμη πληροφορία, αναγκαία για τη διεξαγωγή προσομοίωσης στη συνέχεια.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν σε όλη διαδικασία των προσομοιώσεων είναι αυτές που μετρήθηκαν κατά την εκτέλεση πειράματος φυγοκεντρικής χύτευσης αλουμινίου στη χυτόπρεσσα που περιγράψαμε στο 3^{o} Κεφάλαιο.

i. *Οριακές συνθήκες*

Οι οριακές συνθήκες για το υλικό είναι:

$$T_{solidus} = 625^{o}C$$
$$T_{liquidus} = 634^{o}C$$

Η οριακή συνθήκη για την εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού είναι :

$$T_{mold}^{Εξ.} = 400^{o}C$$

ii. *Αρχικές συνθήκες*

$$T_{m,\,inlet}^{I.C} = 749^{o}C$$
$$T_{mold}^{I.C} = 500^{o}C$$

όπου: : η θερμοκρασία εισόδου του τήγματος στο καλούπι. Ορίζεται ως αρχική συνθήκη (initial condition).

: η αρχική θερμοκρασία του καλουπιού. Πρόκειται για τη θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού. Ορίζεται ως αρχική συνθήκη (initial condition).

iii. *Είδος χύτευσης*

Η εισαγωγή του τήγματος στο καλούπι γίνεται λόγω της φυγοκέντρισης. Φυγόκεντρος δύναμη ασκείται, που ωθεί το λιωμένο μέταλλο να εισχωρήσει με πίεση στην κοιλότητα του τύπου. Η δύναμη που δέχεται το λιωμένο μέταλλο έχει δύο συνιστώσες: την ακτινική και την εγκάρσια. Αντίστοιχες είναι και οι συνιστώσες της ταχύτητας.

Τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν για τη συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής, συναρτήσει της ακτινικής θέσης. Με βάση αυτά, προέκυψε η αρχική ταχύτητα εισόδου του μετάλλου (οριακή συνθήκη εισόδου) και οι οριακές συνθήκες ταχύτητας που ορίστηκαν σε χυτό και καλούπι, ανάλογα με τη θέση των κόμβων, ακτινικά.

Εκθετικη μορφη Σ.Μ.Θ : $htc = at^{-b} + c$

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν σειρές προσομοιώσεων στις οποίες ο συντελεστής έχει εκθετική μορφή, δηλ. έχει τη μορφή

$$htc = at^{-b} + c\ ,$$

όπου: α : είναι ο συντελεστής του χρόνου (t)

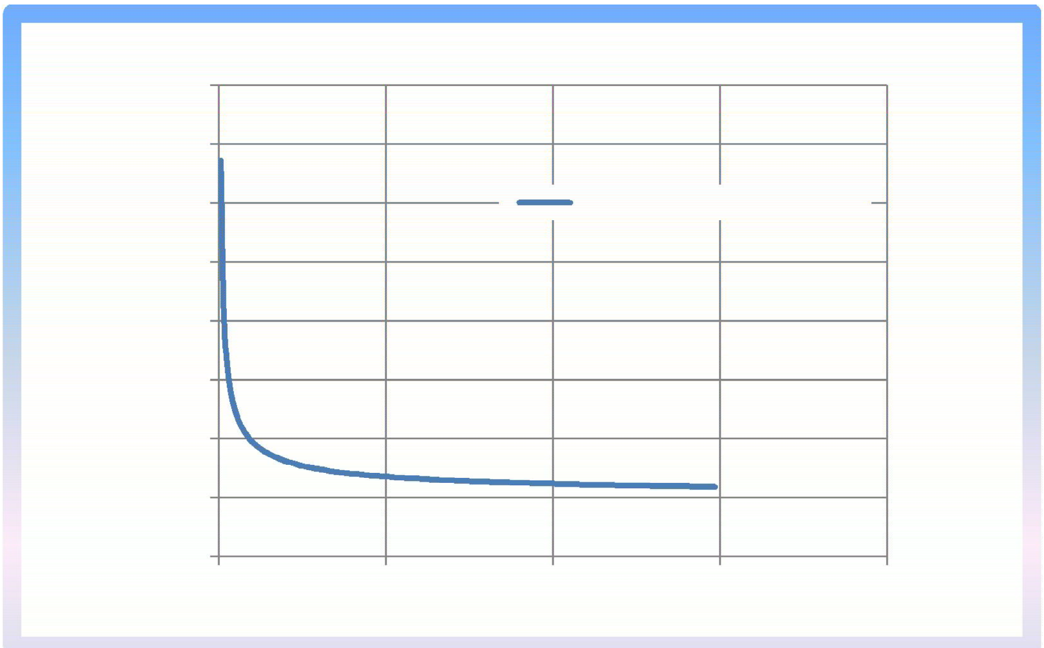
b : είναι η απόλυτη τιμή του εκθέτη

c : είναι σταθερά.

Έχοντας σαν αναφορά την πρόσφατη εργασία των Dong et al., θα διερευνηθεί το κατά πόσο οι τιμές ΣΜΘ που προτείνονται στη συγκεκριμένη εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρεαλιστική προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης ακριβείας.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να τονιστεί πως ο ΣΜΘ εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, όπως το είδος χύτευσης (χύτευση υπό πίεση, χύτευση εν κενώ, χύτευση βαρύτητας, χύτευση αντιβαρύτητας, φυγοκέντριση, κλπ), το υλικό του καλουπιού, το υλικό του μετάλλου, οι αρχικές συνθήκες του πειράματος (αρχική θερμοκρασία μετάλλου, θερμοκρασία προθέρμανσης καλουπιού), η γεωμετρία του χυτού κλπ.

Στην εργασία των Dong et al. Προτείνονται δύο τιμές ΣΜΘ (για διαφορετικό είδος χύτευσης): μία για την απόψυξη χυτού που βρίσκεται σε επαφή με το καλούπι και μία για χυτό που βρίσκεται σε επαφή με ψύχον σώμα. Η τιμή που είναι πιο κοντά στην περίπτωση που εξετάζουμε είναι η πρώτη και θα την χρησιμοποιήσουμε ως περίπτωση αναφοράς (Περίπτωση $1^{η}$: Val1_, Πίνακας 1). Ο συνδυασμός τιμών *a, b και c της περίπτωσης αναφοράς είναι: [a b c] = [1145 0.6 200].*



1η Σειρά Προσομοιώσεων

Στη σειρά προσομοιώσεων ***Val_*** οι τιμές που δώσαμε στις παραμέτρους *a*, *b*, *c* είναι οι τιμές όλων των δυνατών συνδυασμών :

i. $a = [200 \quad 600 \quad 1200]$

ii. $b = [0.1 \quad 0.6 \quad 1.2]$

iii. $c = [0 \quad 200 \quad 600]$

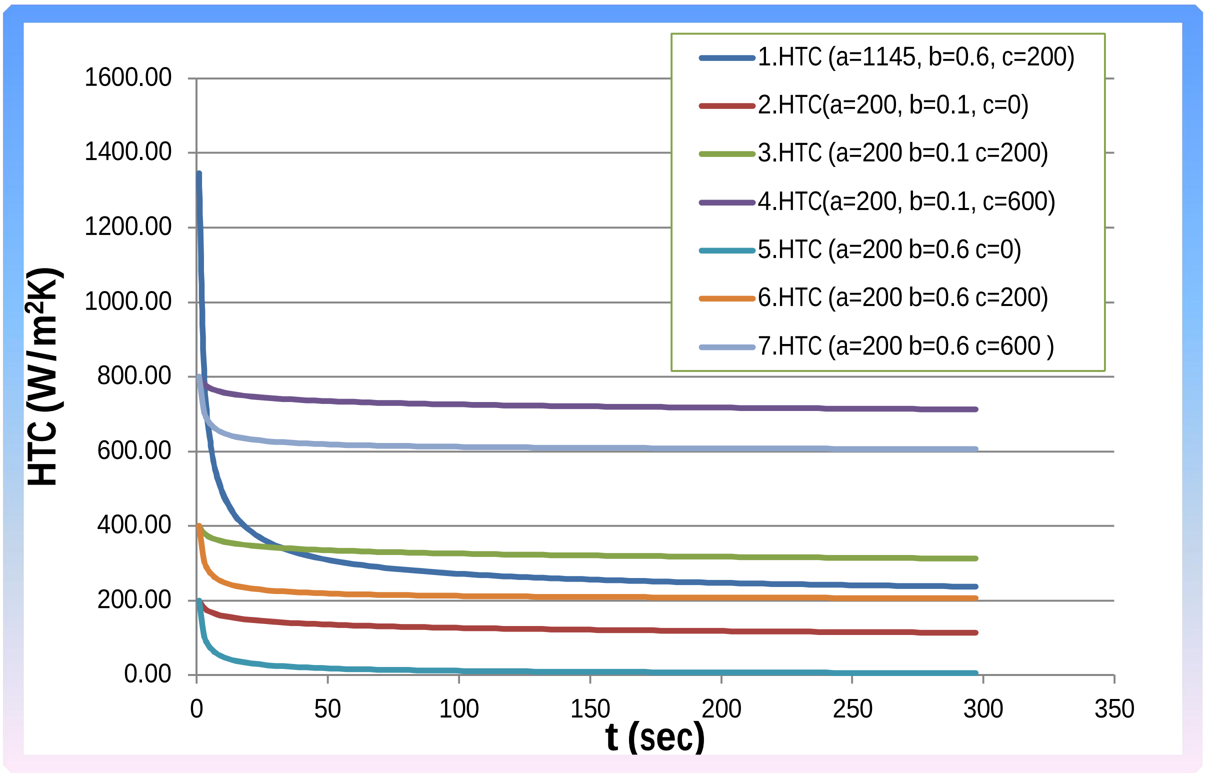
Όλοι οι συνδυασμοί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακα 1) αναλυτικά.

Πίνακας 1: Συνδυασμός παραμέτρων a, b και c για τη σειρά προσομοιώσεων Val_.

	$htc = at^{-b} + c$ *(Σειρά προσομοιώσεων Val_)*		
α/α	a	b	c
*Val1_*	1145	0,6	200
*Val2_*	200	0,1	0
*Val3_*	200	0,1	200
*Val4_*	200	0,1	600
*Val5_*	200	0,6	200
*Val6_*	200	0,6	200
*Val7_*	200	0,6	600
*Val8_*	200	1,2	0
*Val9_*	200	1,2	200
*Val10_*	200	1,2	600
*Val11_*	1200	0,1	0
*Val12_*	1200	0,1	200
*Val13_*	1200	0,1	600
*Val14_*	1200	0,6	0
*Val15_*	1200	0,6	200
*Val16_*	1200	0,6	600
*Val17_*	1200	1,2	0
*Val18_*	1200	1,2	200
*Val19_*	1200	1,2	600
*Val20_*	2000	0,1	0
*Val21_*	2000	0,1	200
*Val22_*	2000	0,1	600
*Val23_*	2000	0,6	0
*Val24_*	2000	0,6	200
*Val25_*	2000	0,6	600
*Val26_*	2000	1,2	0
*Val27_*	2000	1,2	200
*Val28_*	2000	1,2	600

Οι Σ.Μ.Θ που αντιστοιχούν σε κάθε έναν από τους παραπάνω συνδυασμούς φαίνονται σχηματικά παρακάτω:

$$htc = at^{-b} + c$$



Εικόνα 5 : Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Val_ από 1-7.

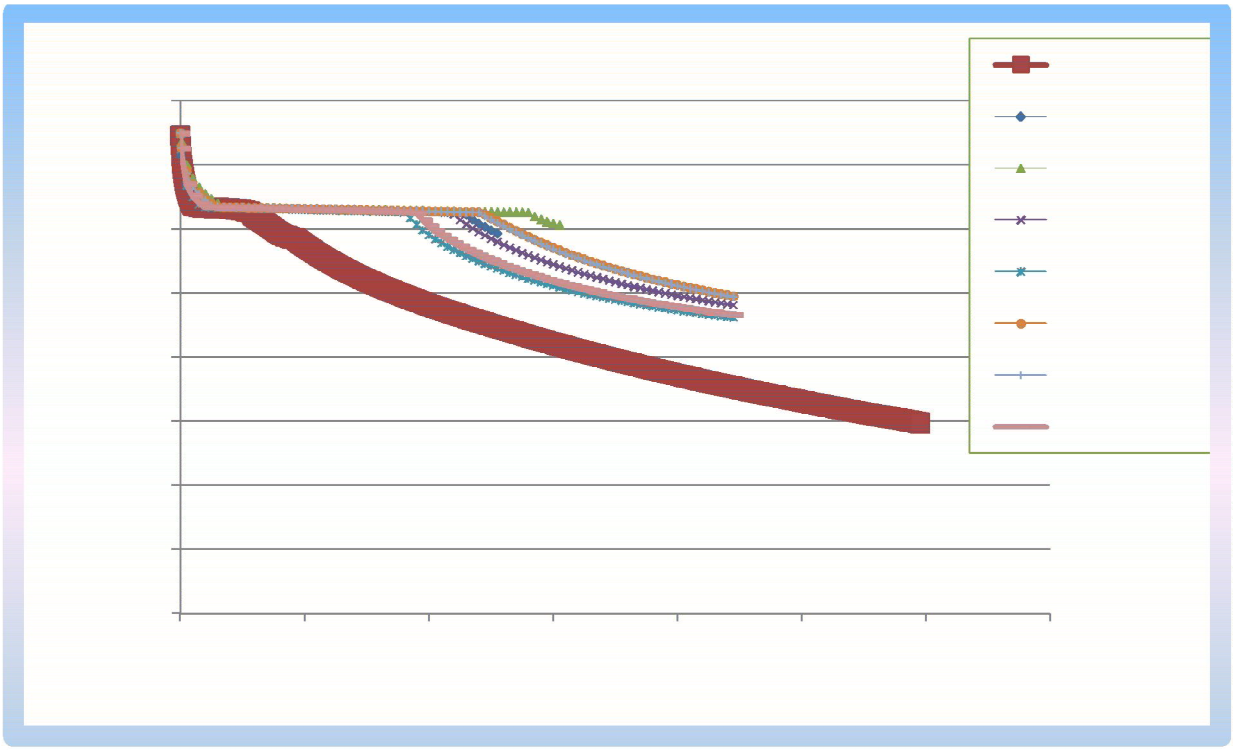
Σε αυτούς τους 27 συνδυασμούς, καλύπτεται ένα εύρος τιμών ΣΜΘ γύρω από την τιμή που προτείνεται από τη βιβλιογραφία (case 1).

Συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις 2-7 αφορούν σε ΣΜΘ που είναι – σε σχέση με τον ΣΜΘ της περίπτωσης 1 – μειωμένοι κατά 80.44-98.77% στα πρώτα 0.05sec. Αυτό συμβαίνει επειδή οι τιμές a και c που επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη σειρά προσομοιώσεων είναι συγκριτικά μικρές.

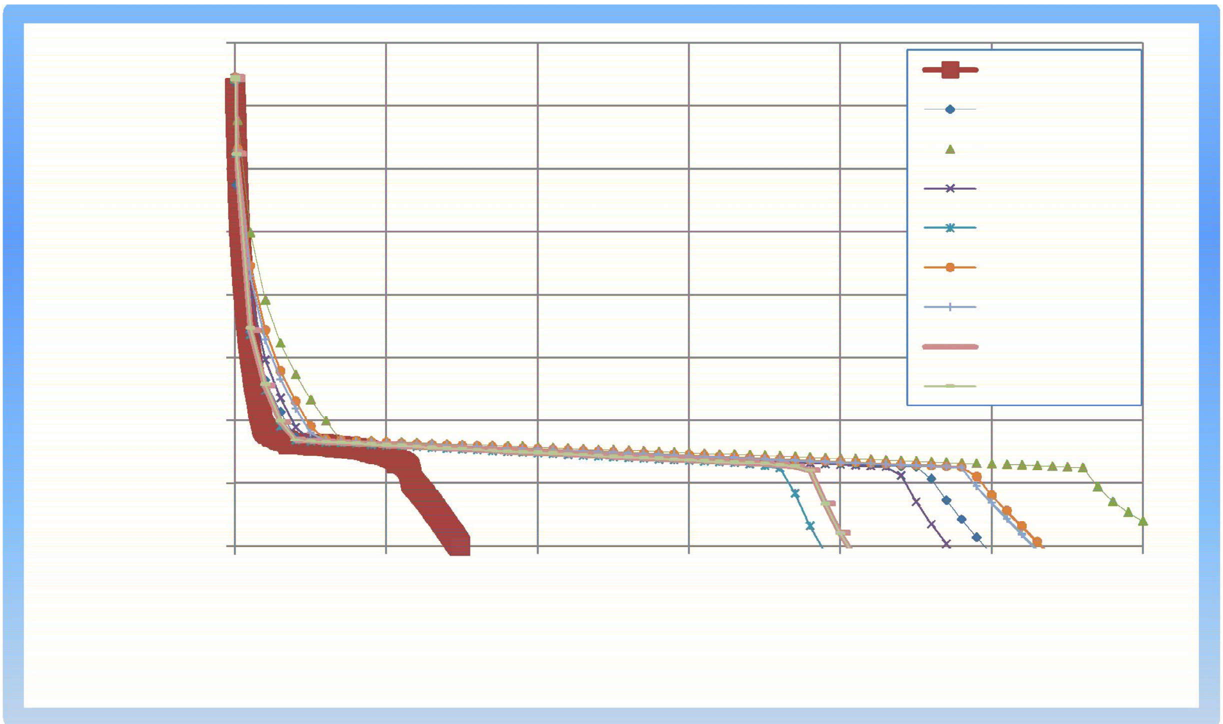
Από το 10sec περίπου, η ποιοτική κατανομή των ΣΜΘ αλλάζει και η περίπτωση αναφοράς (case 1) φαίνεται πως έχει μία ενδιάμεση τιμή. Στα 300 sec, κάποιες από τις τιμές των περιπτώσεων 2-7 είναι από 82.66% μικρότερες έως 224.72% μεγαλύτερες από την τιμή του ΣΜΘ αναφοράς.

Εκτελώντας λοιπόν προσομοιώσεις με τις παραπάνω τιμές των Σ.Μ.Θ, προέκυψαν οι καμπύλες απόψυξης που ακολουθούν. Εστιάζουμε κυρίως στο 2^o στάδιο της απόψυξης όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση των προσομοιωμένων καμπύλων απόψυξης από την πειραματική ενώ παράλληλα καταγράφουμε και το εύρος της αποκλισης κατά την έναρξη και το πέρας της στερεοποίησης.

Temperature – Time



Εικόνα 6 : Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Val_ (1-7).

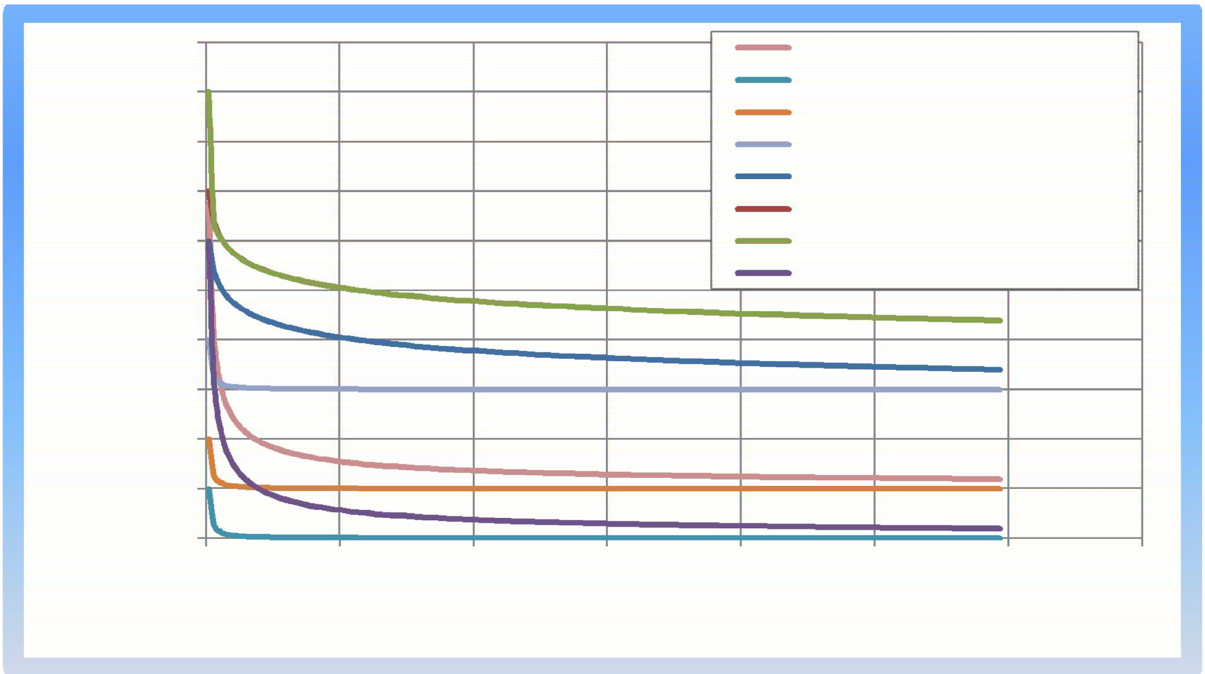


Εικόνα 4*: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Val_(1-7), εστιάζοντας στα πρώτα δευτερόλεπτα της χύτευσης.*

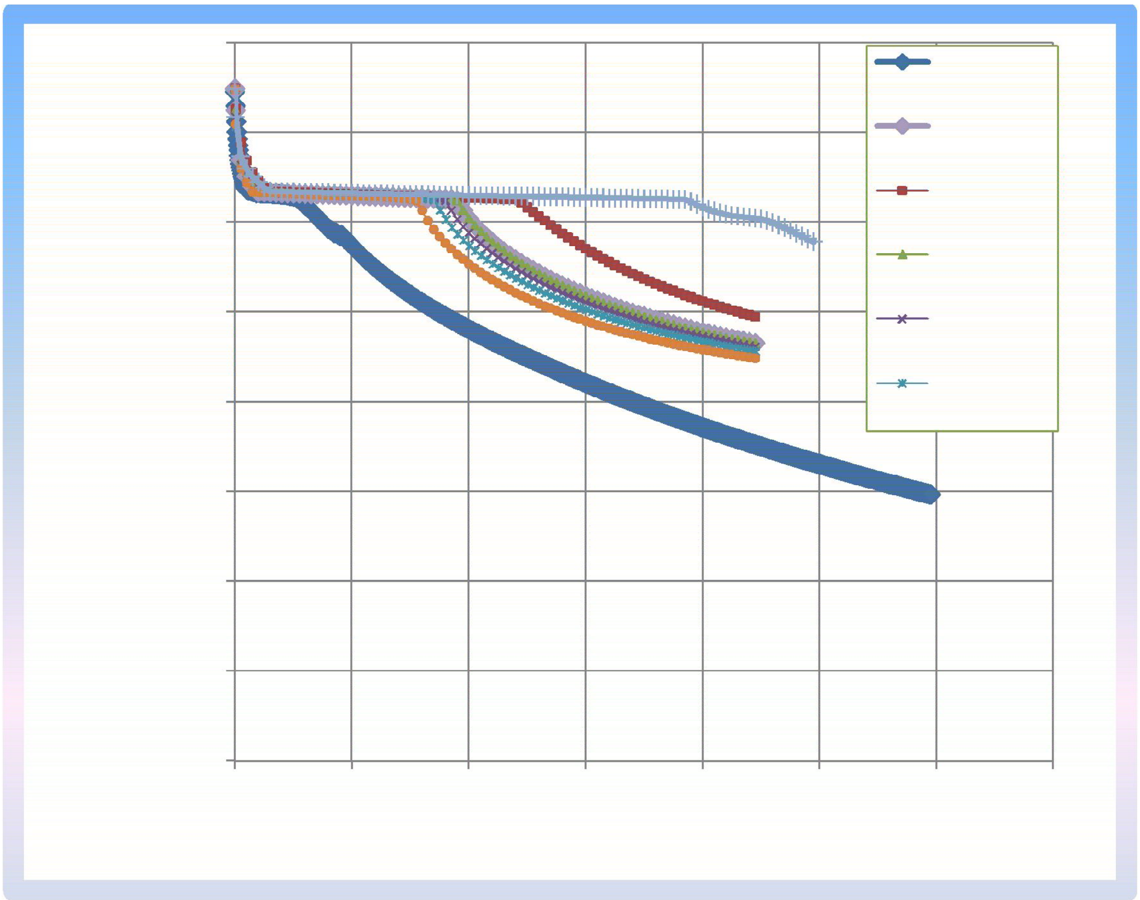
Ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων συνοψίζεται στους ακόλουθους πίνακες:

	Έναρξη στερεοποίησης (sec)	Απόκλιση / Σφάλμα
Experiment	**25**	
Val1_	30	20%
Val2_	60	140%
Val3_	40	60%
Val4_	40	60%
Val5_	50	100%
Val6_	30	20%
Val7_	30	20%

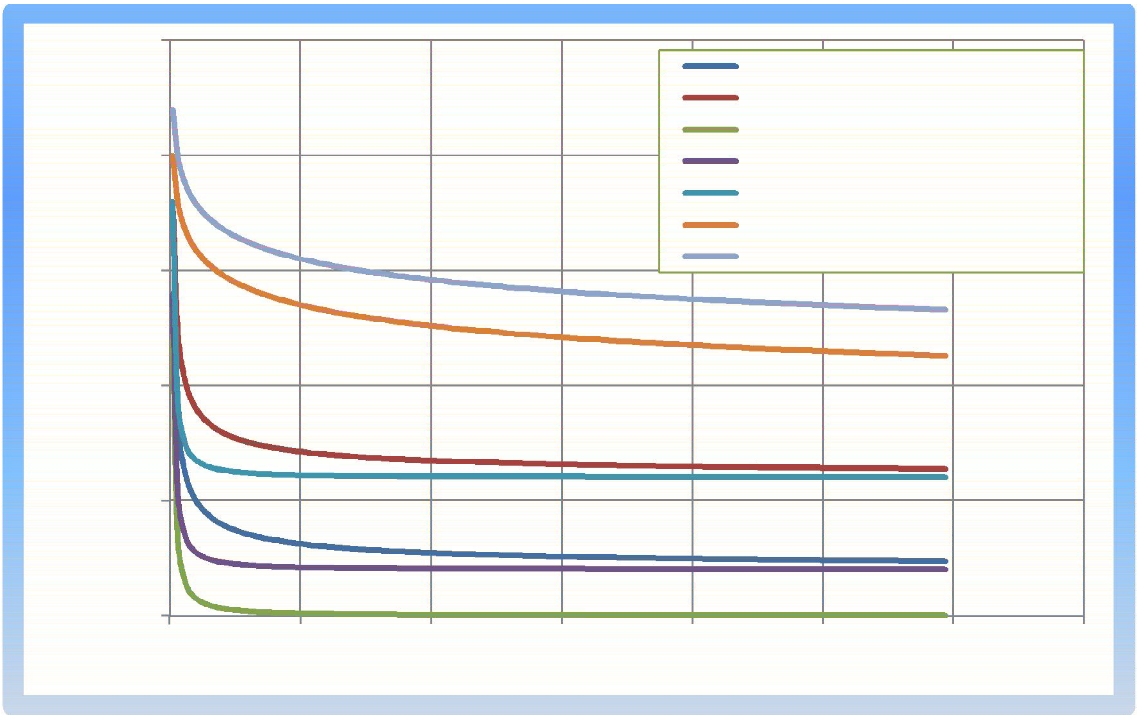
	Πέρας στερεοποίησης (sec)	Απόκλιση / Σφάλμα
Experiment	**115**	
Val1_	450	291%
Val2_	560	387%
Val3_	430	274%
Val4_	360	213%
Val5_	480	317%
Val6_	480	317%
Val7_	380	230%



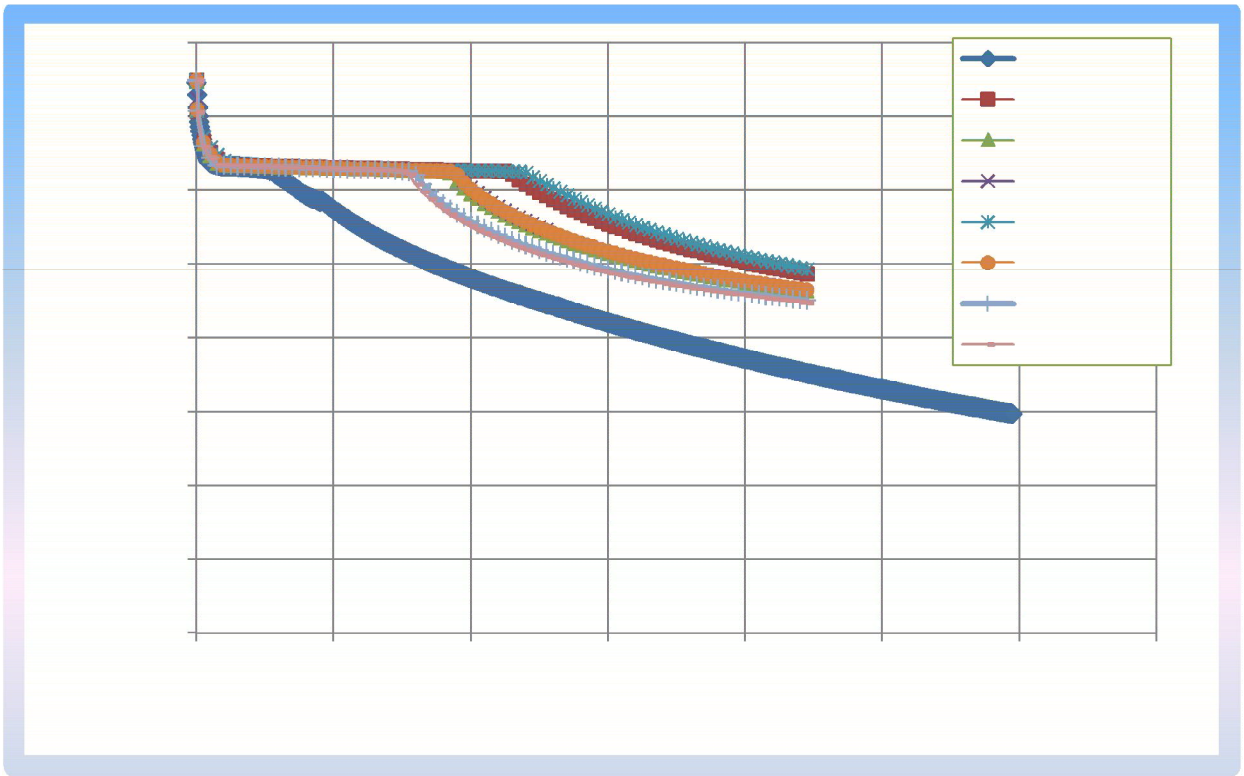
Εικόνα 8 : Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Val_ από 8-14.



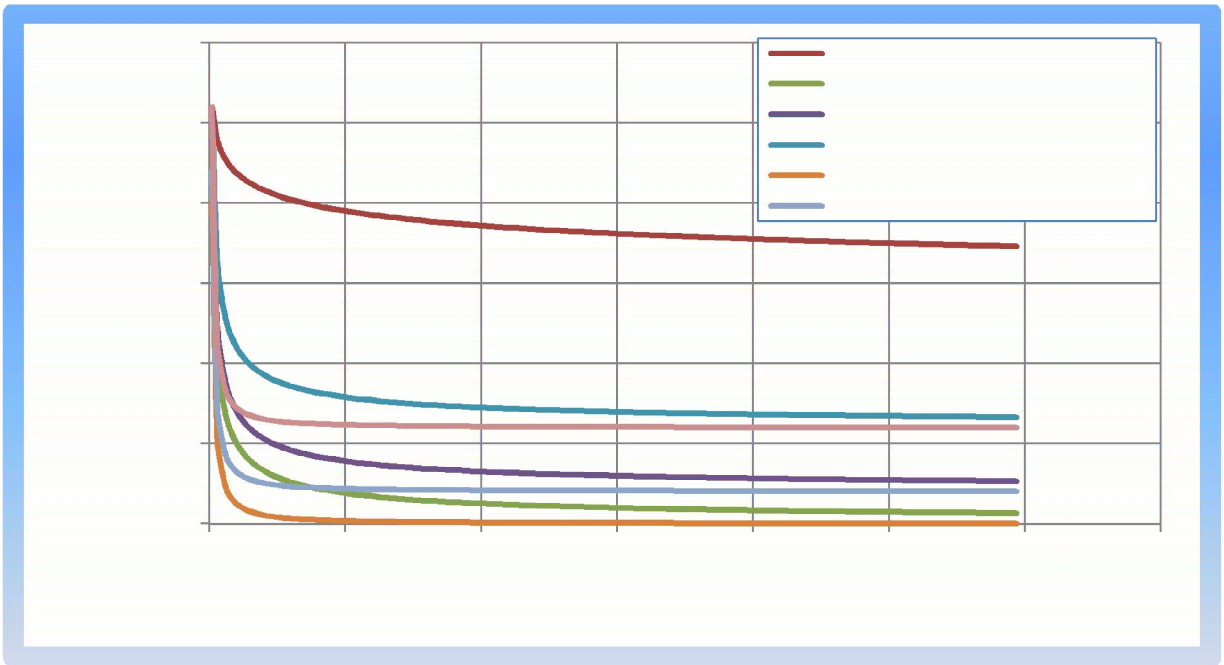
Εικόνα 9: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Val_ (8-14).



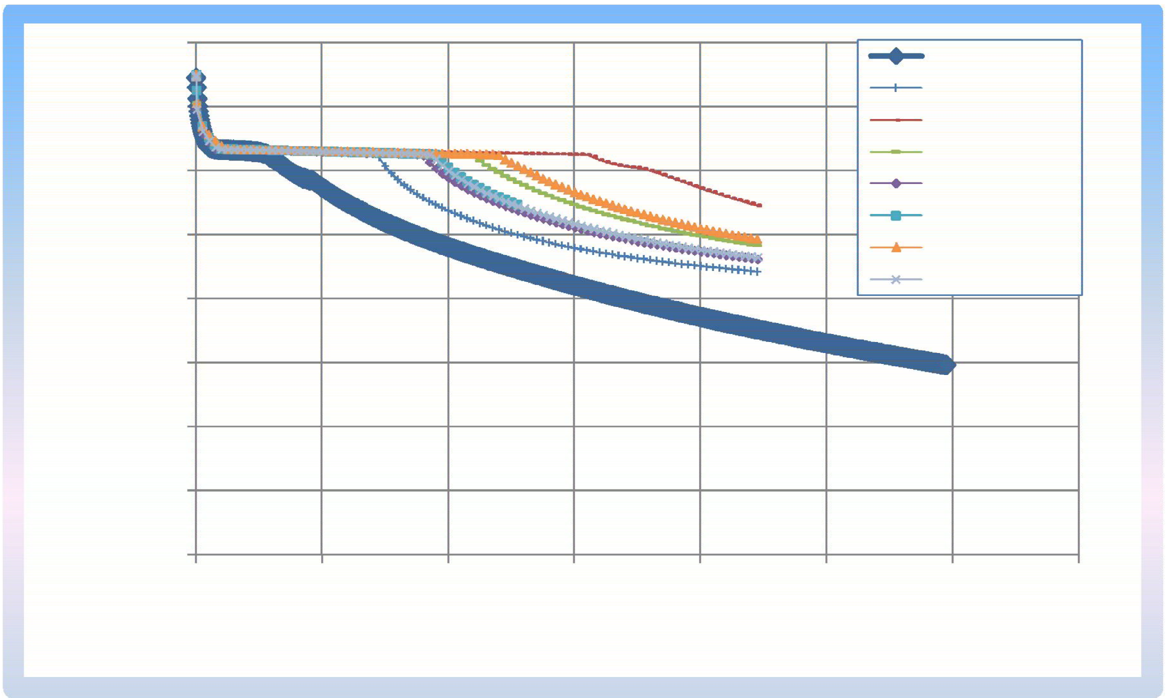
Εικόνα 10: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Val_ από 15-21.



Εικόνα 11: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Val_ (15-21).



Διάγραμμα: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Val_ από 22-28.



Εικόνα 12: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Val_ (22-28).

Συμπεράσματα από την $1^{η}$ σειρά προσομοιώσεων

Από την πρώτη σειρά προσομοιώσεων παρατηρούμε, σε πρώτη προσέγγιση, ότι για τις τιμές *a, b και c* που επιλέξαμε οι καμπύλες απόψυξης που προέκυψαν από τις παραπάνω προσομοιώσεις αποκλίνουν αρκετά από την πειραματική. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στην περιοχή της στερεοποίησης .

Αν παρατηρήσουμε προσεκτικότερα όμως τις κλίσεις των προσομοιωμένων καμπύλων απόψυξης θα δούμε ότι γενικά για τις περισσότερες από τις παραπάνω προσομοιώσεις, οι κλίσεις είναι παρόμοιες με αυτές της πειραματικής καμπύλης απόψυξης. Ειδικότερα, με εξαίρεση το στάδιο της στερεοποίησης, οι κλίσεις των προσομοιωμένων καμπύλων παρατηρούνται πανομοιότυπες με αυτές της πειραματικής, μετατοπισμένες όμως δεξιότερα, λόγω της εκτεταμένης διάρκειας της στερεοποίησης που λαμβάνει χώρα κατά την κάθε προσομοίωση.

Έτσι λοιπόν σε πρώτη φάση μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η διαδικασία απόψυξης χωρίζεται σε τρία χρονικά στάδια . Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση την πειραματική καμπύλη απόψυξης και θα μας διευκολύνει σε όλη τη πορεία της εργασίας.

$1^{ο}$ στάδιο ***t=(0 - 30) sec*** : Από τη στιγμή έγχυσης του τήγμένου μετάλλου στο καλούπι, σε θερμοκρασία όπως προαναφέραμε $T_{melt} = 749^{0}C$, έως και την έναρξη της στερεοποίησης.

2ο στάδιο ***t=(30 – 100) sec*** : Από την έναρξη της στερεοποίησης έως και το πέρας της.

$T_{liquidus} = 634^0 C$ και $T_{solidus} = 625^0 C$.

3ο στάδιο ***t=(30 - 300) sec*** : Το χρονικό εύρος από το πέρας της στερεοποίησης έως το πέρας της διαδικασίας απόψυξης.

Οι τιμές a, b και c που επιλέξαμε, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για το 1ο και το 3ο στάδιο της απόψυξης αλλά επιμηκύνουν κατά πολύ το 2ο στάδιο. Ως εκ τούτου θα πρέπει να δοκιμάσουμε διαφορετικές τιμές και συνδυασμούς ώστε να περιορίσουμε το στάδιο της στερεοποίησης .

Αν παρατηρήσουμε πιο προσεκτικά, θα δούμε ότι για τις προσομοιώσεις για τις οποίες η παράμετρος *c* λαμβάνει την τιμή **c=600**, οι καμπύλες απόψυξης έρχονται όλο και πιο κοντά στην πειραματική. Αντίθετα, οι προσομοιώσεις για τις οποίες δε λάβαμε καθόλου αποτελέσματα διότι η περιοχή της στερεοποίησης επιμηκύνθηκε πάρα πολύ, είναι αυτές για τις οποίες μηδενίζεται η παράμετρος **c=0**.

Η μορφή του Σ.Μ.Θ $htc = at^{-b} + c$ θα πρέπει να έχει *πάντα τιμή* $c \neq 0$ και θα πρέπει να είναι *όσο το δυνατόν μεγαλύτερη* διότι καθορίζει το 2ο στάδιο της διαδικασίας προσομοίωσης.

Με βάση τα παραπάνω πρώτα συμπεράσματα , πραγματοποιούμε μια ακόμα σειρά προσομοιώσεων δίνοντας μεγαλύτερες τιμές στην παραμετρο *c* και διατηρώντας τις *a, b*, ίδιες με προηγουμένως.

2η Σειρά Προσομοιώσεων

Στη 2η σειρά προσομοιώσεων με ονομασία ***Kos_***, δίνουμε στη *c* τις τιμές

$$c = [1000 \;\; 2000 \;\; 3000]$$

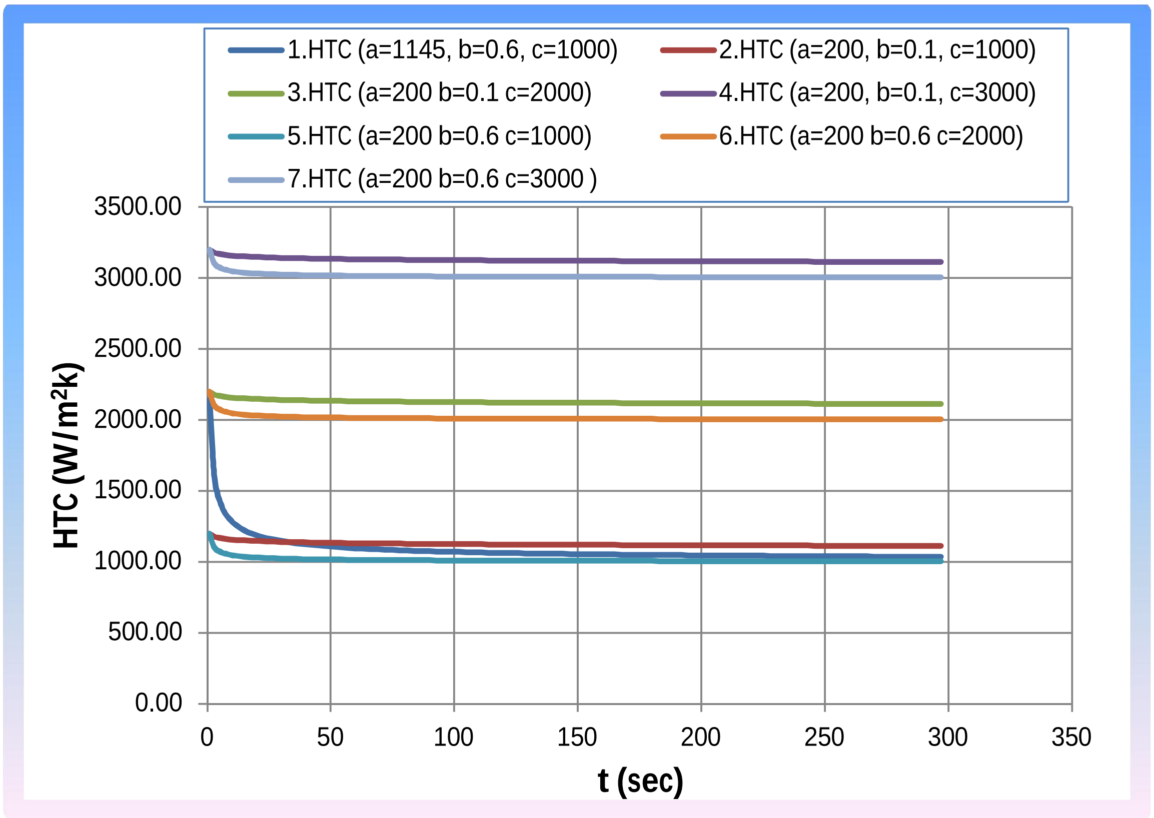
Πραγματοποιούμε ένα μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων σε αυτή τη σειρά με τις παραμέτρους a, b, c να λαμβάνουν τις τιμές όλων των παρακάτω συνδυασμών :

iv. $a = [200 \quad 600 \quad 1200]$

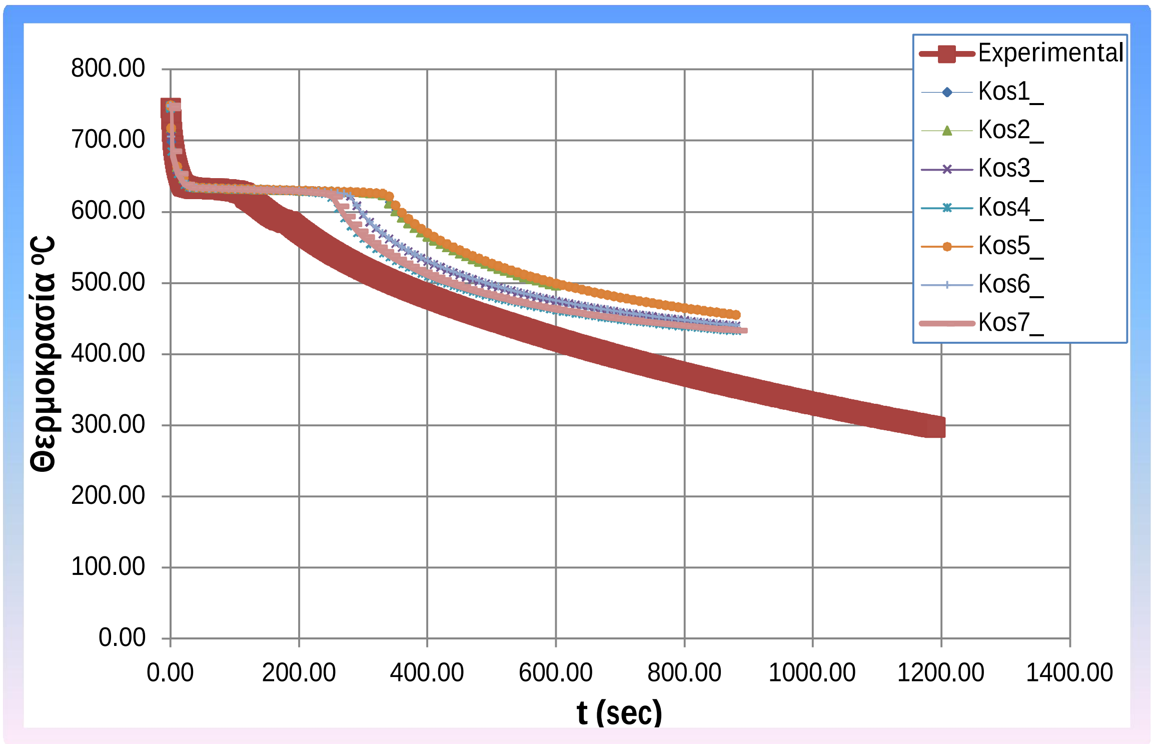
v. $b = [0.1 \quad 0.6 \quad 1.2]$

vi. $c = [1000 \;\; 2000 \;\; 3000]$

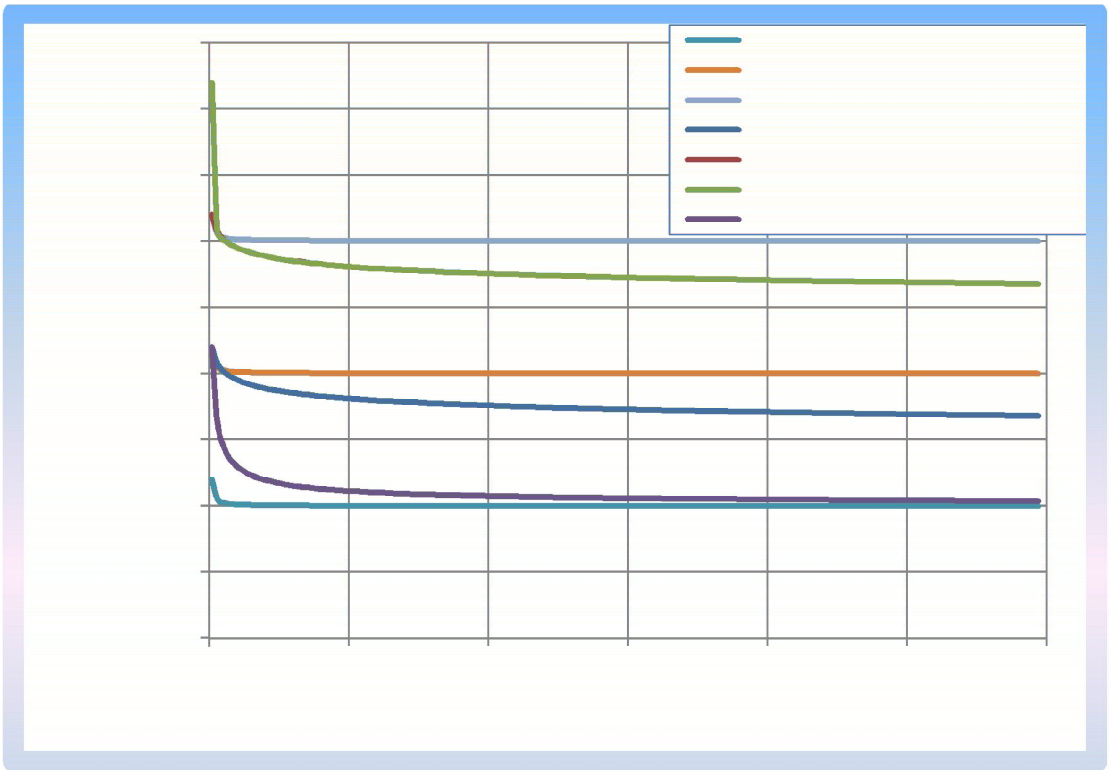
	$htc = at^{-b} + c$ (*Σειρά προσομοιώσεων Kos_*)		
α/α	a	b	c
*Kos1_*	1145	0,6	1000
*Kos2_*	200	0,1	1000
*Kos3_*	200	0,1	2000
*Kos4_*	200	0,1	3000
*Kos5_*	200	0,6	1000
*Kos6_*	200	0,6	2000
*Kos7_*	200	0,6	3000
*Kos8_*	200	1,2	1000
*Kos9_*	200	1,2	2000
*Kos10_*	200	1,2	3000
*Kos11_*	1200	0,1	1000
*Kos12_*	1200	0,1	2000
*Kos13_*	1200	0,1	3000
*Kos14_*	1200	0,6	1000
*Kos15_*	1200	0,6	2000
*Kos16_*	1200	0,6	3000
*Kos17_*	1200	1,2	1000
*Kos18_*	1200	1,2	2000
*Kos19_*	1200	1,2	3000
*Kos20_*	2000	0,1	1000
*Kos21_*	2000	0,1	2000
*Kos22_*	2000	0,1	3000
*Kos23_*	2000	0,6	1000
*Kos24_*	2000	0,6	2000
*Kos25_*	2000	0,6	3000
*Kos26_*	2000	1,2	1000
*Kos27_*	2000	1,2	2000
*Kos28_*	2000	1,2	3000



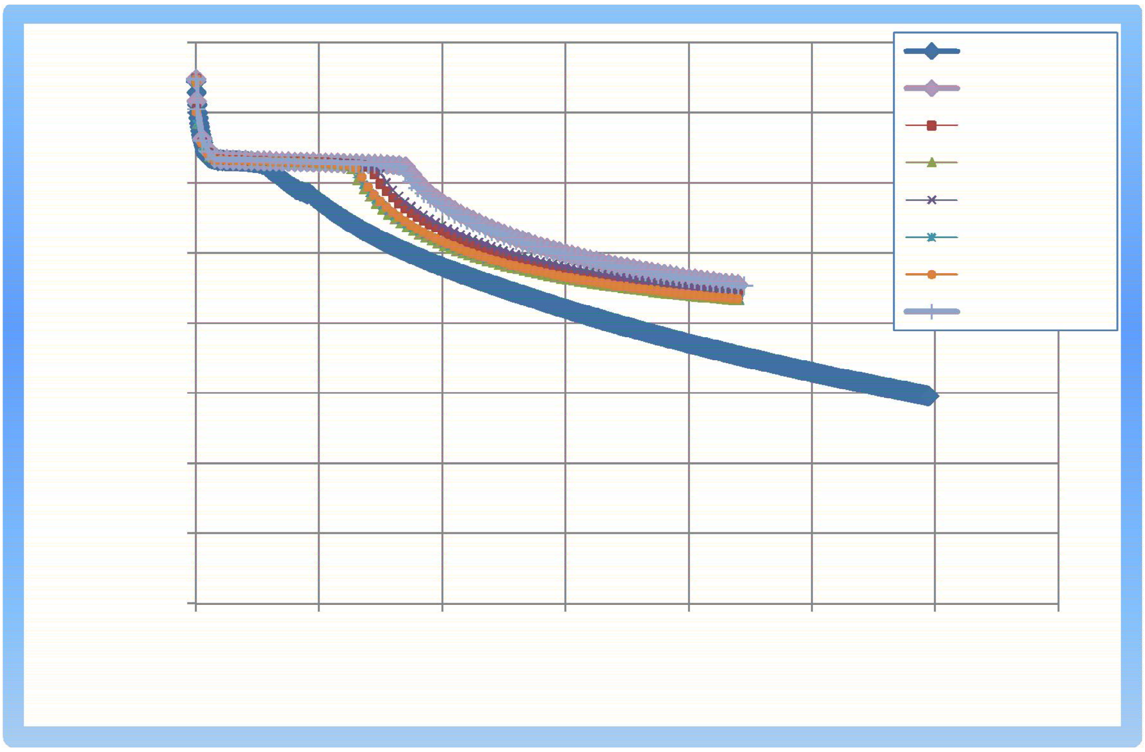
Εικόνα 12: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ από 1-7.



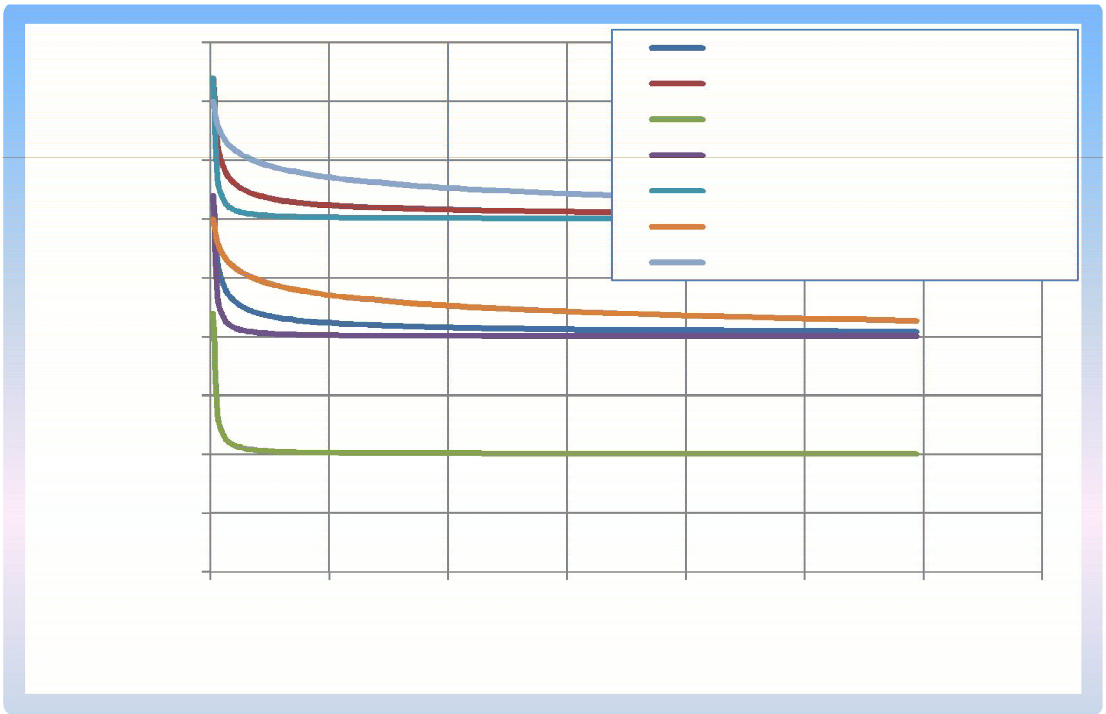
Εικόνα 13: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (1-7).



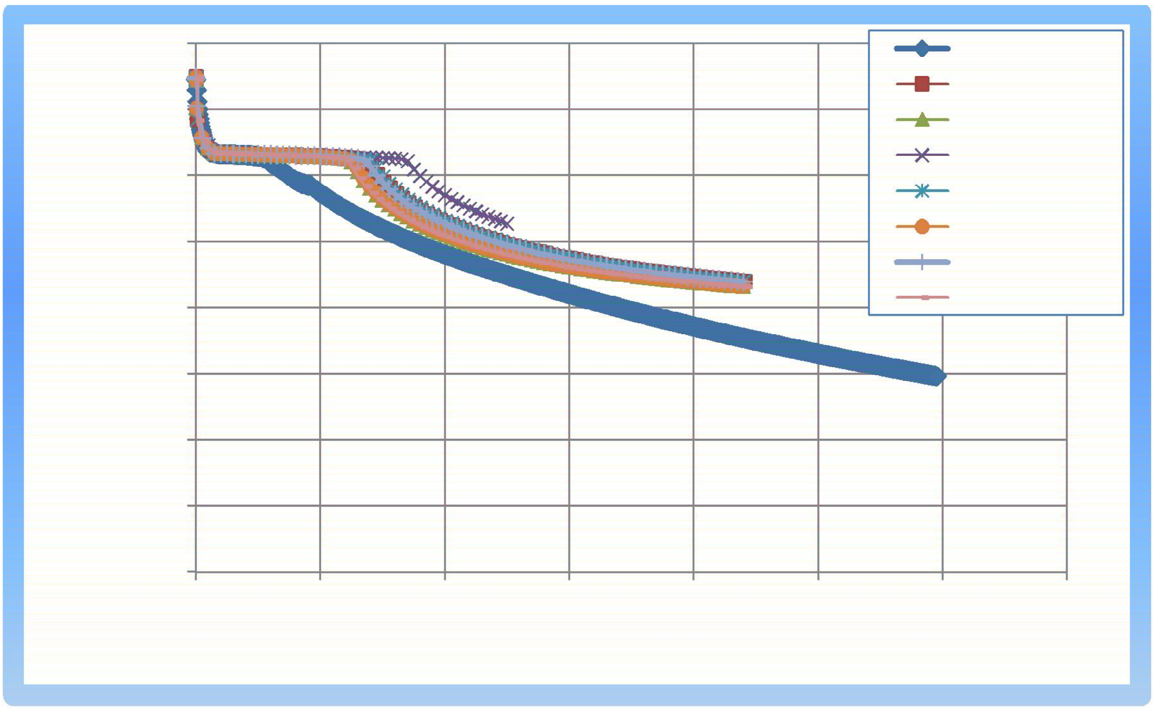
Εικόνα 14: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 8-14.



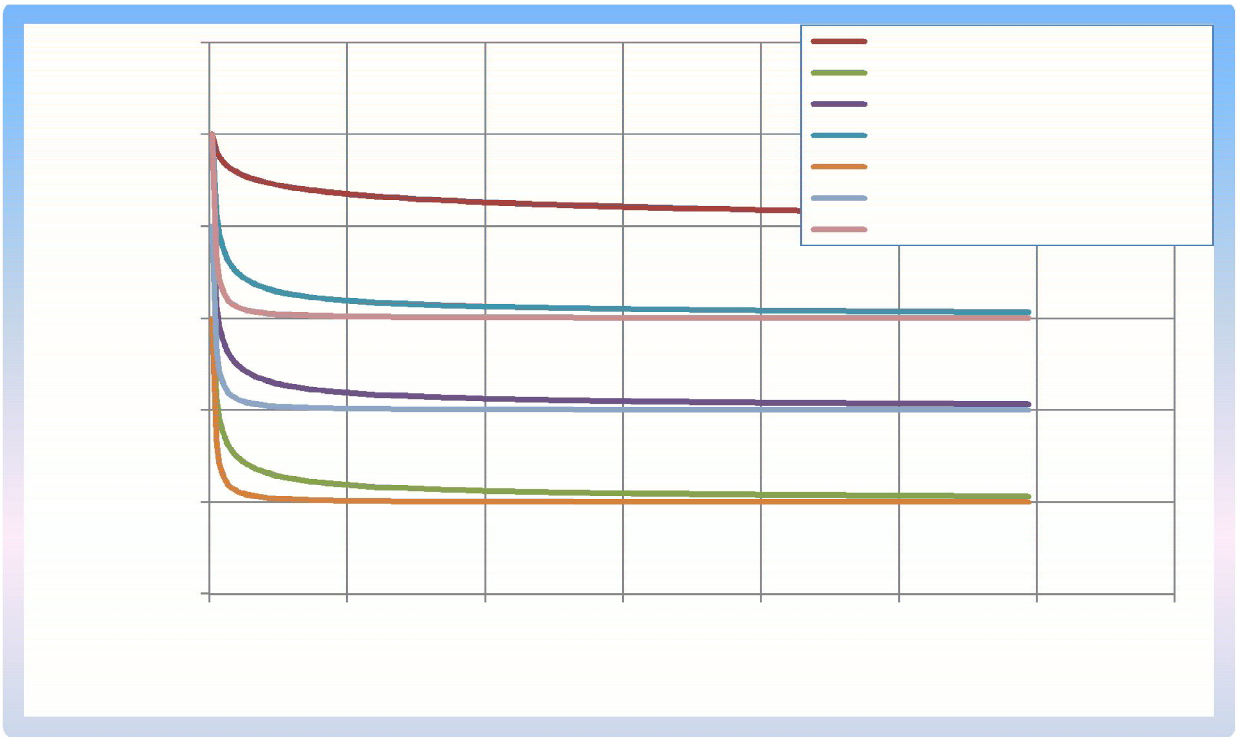
Εικόνα 15: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (8-14).



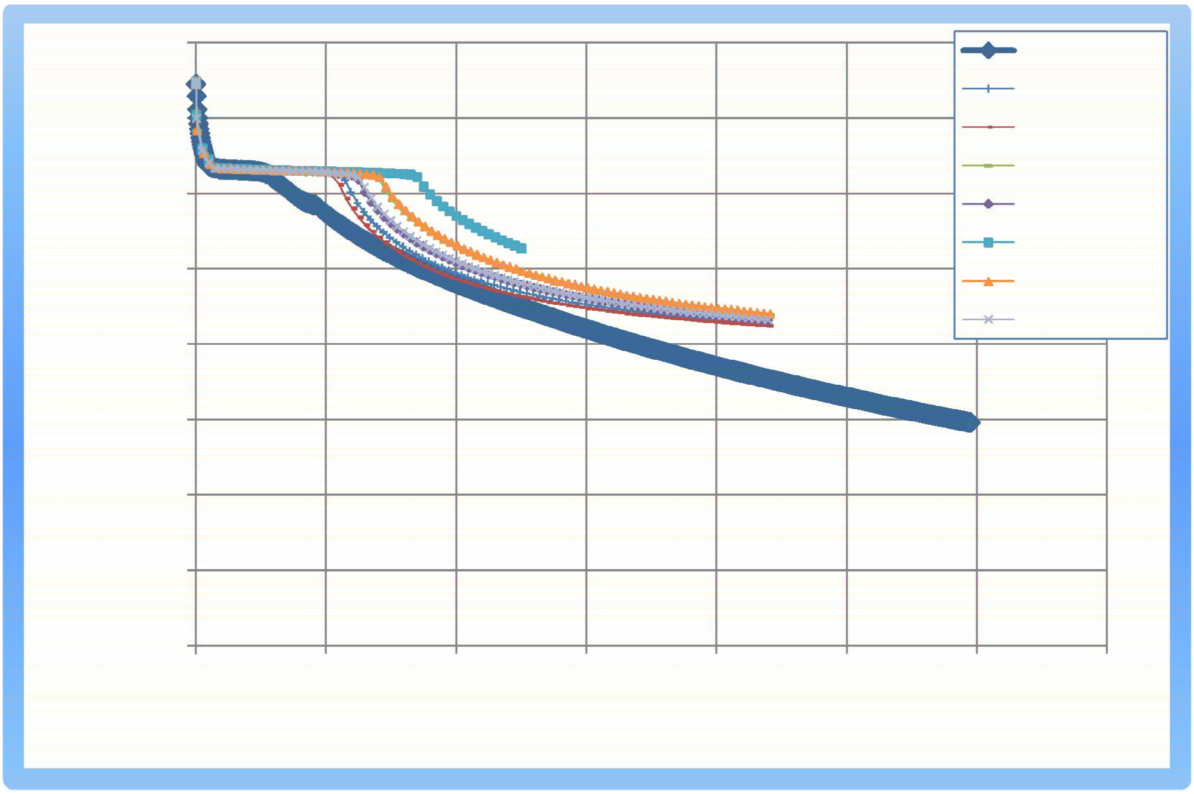
Εικόνα 16: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 15-21.



Διάγραμμα: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (15-21).



Εικόνα 17: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 21-28.



Εικόνα 18: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (21-28).

Συμπεράσματα από την 2η σειρά προσομοιώσεων

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ξεκάθαρα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου *c* στον *εκθετικό Σ.Μ.Θ* τόσο περισσότερο περιορίζεται, στην προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης, το 2ο στάδιο στην καμπύλη απόψυξης.

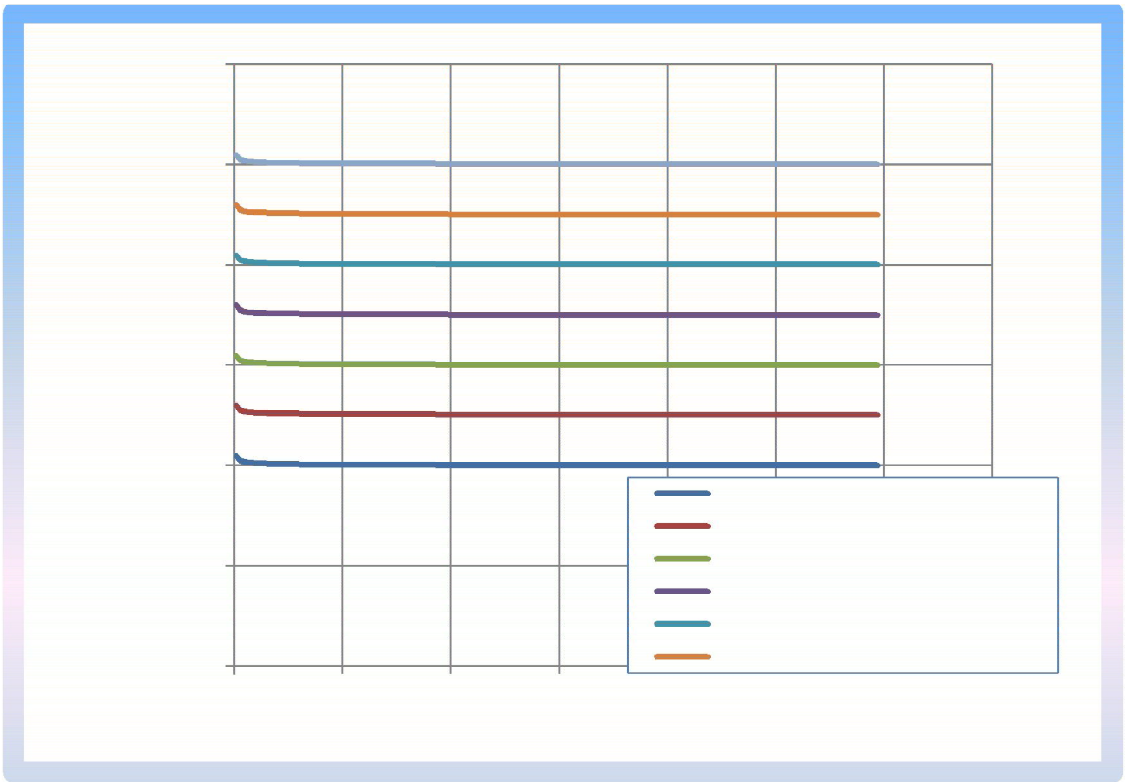
Αυτό φαίνεται κυρίως από τα πρώτα δύο διαγράμματα όπου η τιμή της παραμέτρου *c* είναι αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή της παραμέτρου *a.* Βέβαια, στο τελευταίο διάγραμμα αυτής της σειράς προσομοιώσεων, στο οποίο και η παράμετρος *a*, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, παρατηρείται η καλύτερη σύγκλιση. Συνεπώς αντιλαμβανομαστε ότι εκτός από την τιμή της παραμέτρου *c,* θα πρέπει να τροποποιήσουμε και την παράμετρο *a.*

Πριν όμως προχωρήσουμε στη μελέτη της παραμέτρου *a,* θα ήταν χρήσιμο να εκτελέσουμε μια ακόμα σειρά προσομοιώσεων με ακόμα μεγαλύτερες τιμές για την παράμετρο *c,* ώστε να έχουμε μια πλήρη εποπτεία στο πώς μεταβάλονται οι καμπύλες απόψυξης σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου.

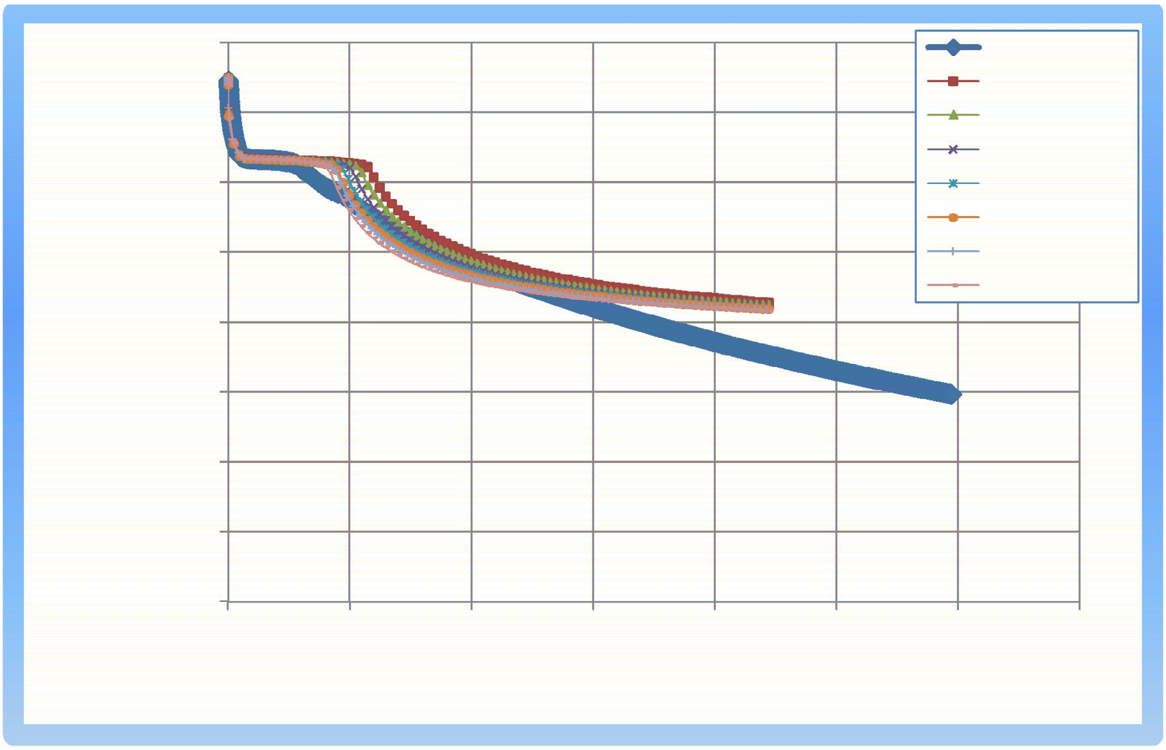
Επεκτείνουμε λοιπόν τις προσομοιώσεις της σειράς ***Kos_*** δοκιμάζοντας αυτή τη φορά παρόμοιους με τους προηγούμενους συνδυασμούς της σειράς, με συνδυασμούς που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

3η σειρά προσομοιώσεων

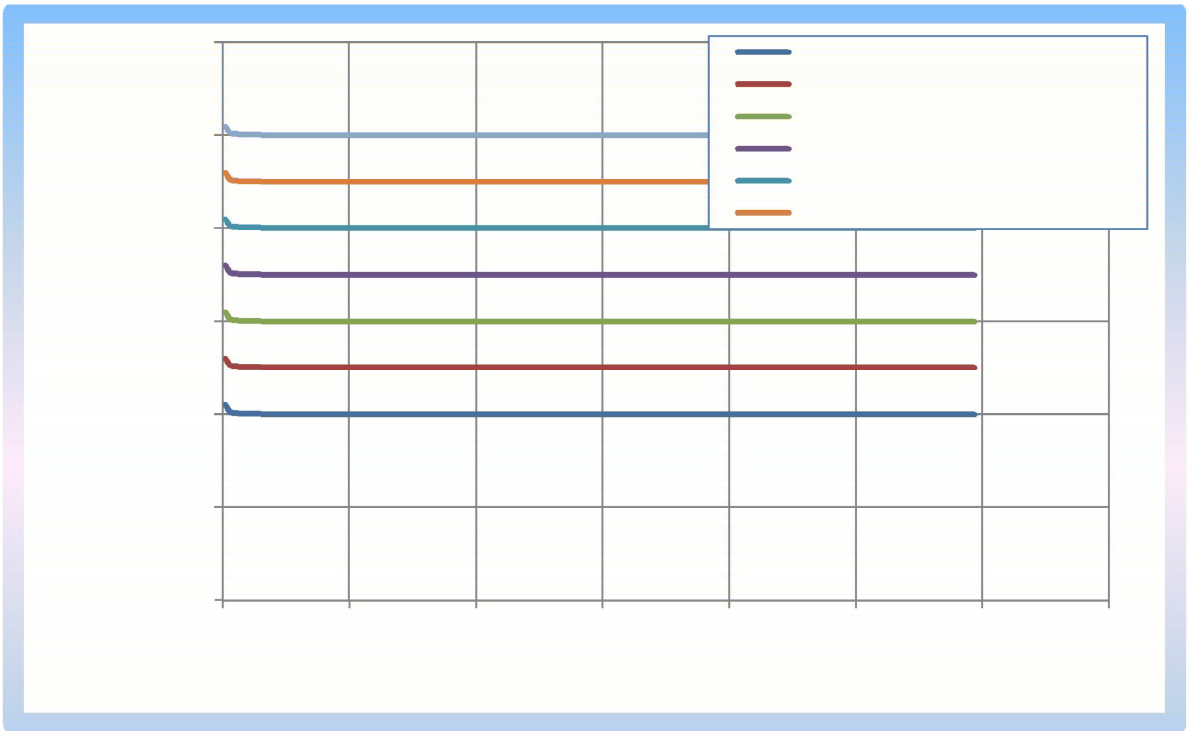
	$htc = at^{-b} + c$ (Σειρά προσομοιώσεων Kos_29-56)		
α/α	a	b	c
Kos29_	200	0,6	4000
Kos30_	200	0,6	5000
Kos31_	200	0,6	6000
Kos32_	200	0,6	7000
Kos33_	200	0,6	8000
Kos34_	200	0,6	9000
Kos35_	200	0,6	10000
Kos36_	200	1,2	4000
Kos37_	200	1,2	5000
Kos38_	200	1,2	6000
Kos39_	200	1,2	7000
Kos40_	200	1,2	8000
Kos41_	200	1,2	9000
Kos42_	200	1,2	10000
Kos43_	500	0,6	4000
Kos44_	500	0,6	5000
Kos45_	500	0,6	6000
Kos46_	500	0,6	7000
Kos47_	500	0,6	8000
Kos48_	500	0,6	9000
Kos49_	500	0,6	10000
Kos50_	500	1,2	4000
Kos51_	500	1,2	5000
Kos52_	500	1,2	6000
Kos53_	500	1,2	7000
Kos54_	500	1,2	8000
Kos55_	500	1,2	9000
Kos56_	500	1,2	10000



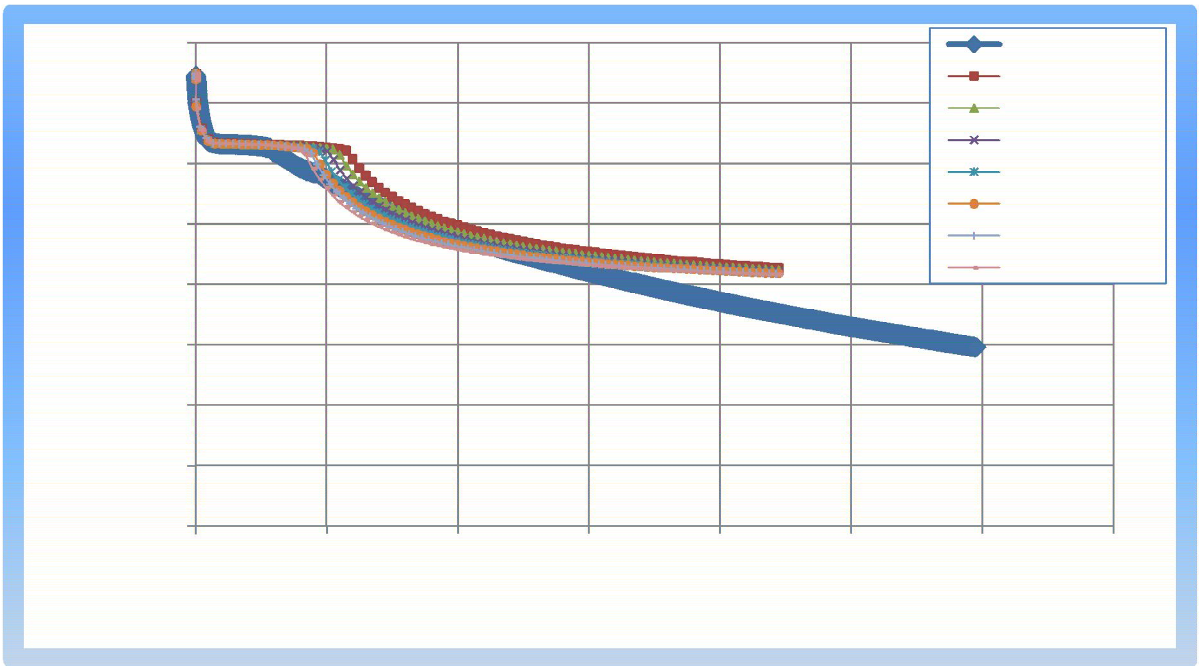
Εικόνα 19: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 29-35.



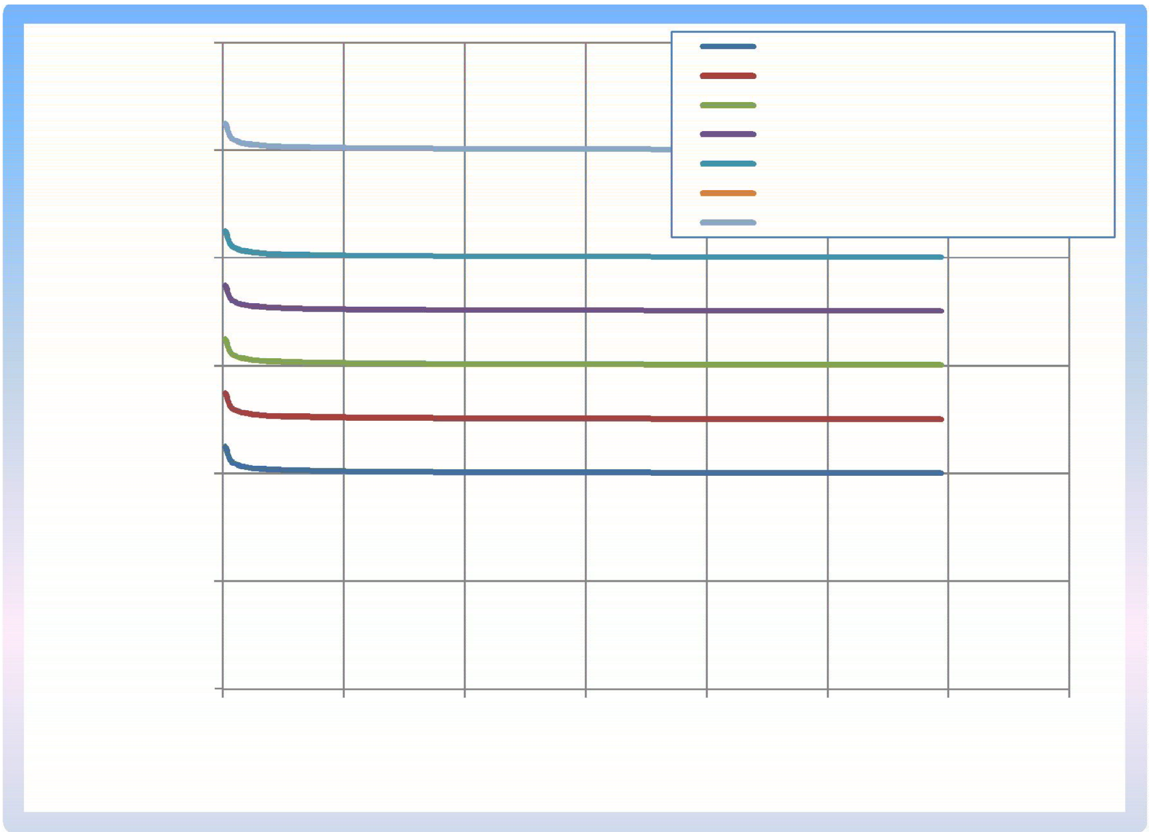
Εικόνα 20: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (29-35).



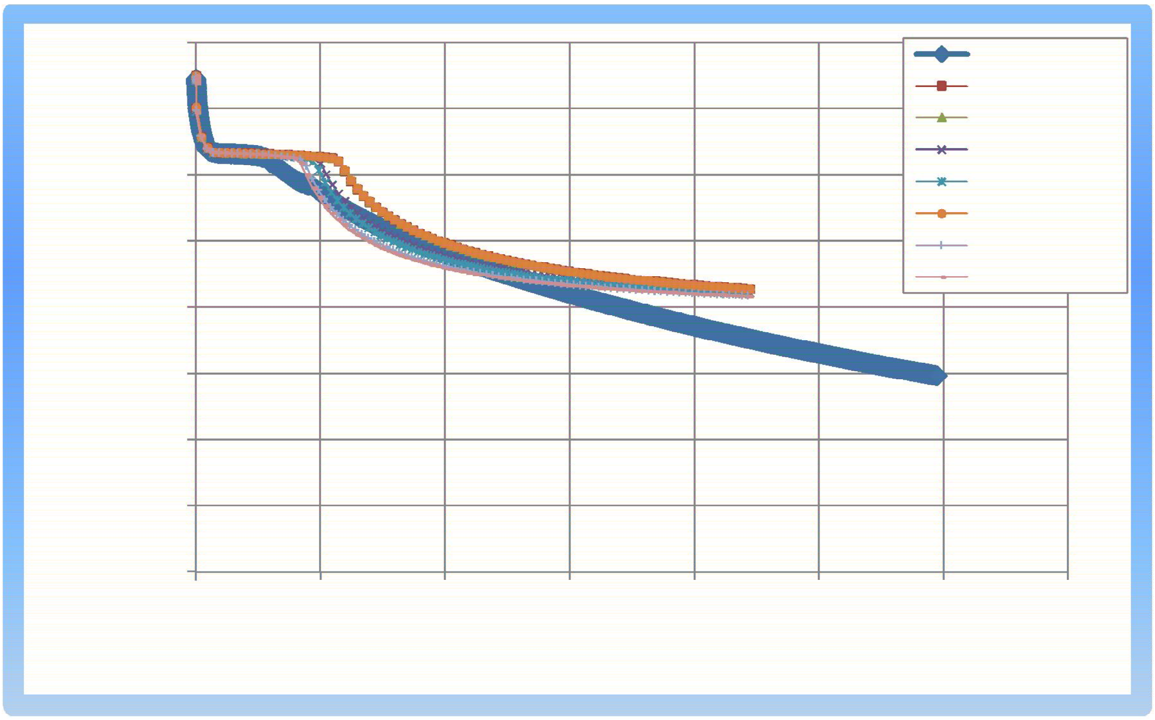
Εικόνα 21: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 36-42.



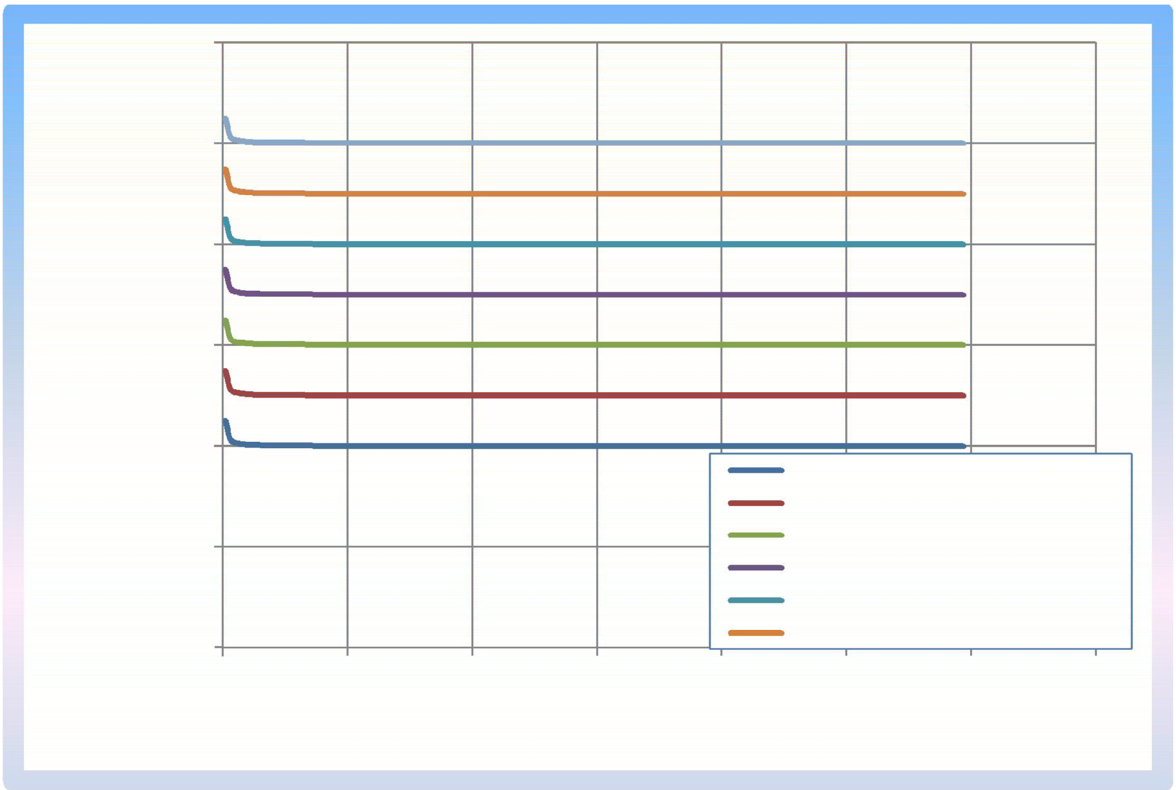
Εικόνα 22: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (36-42).



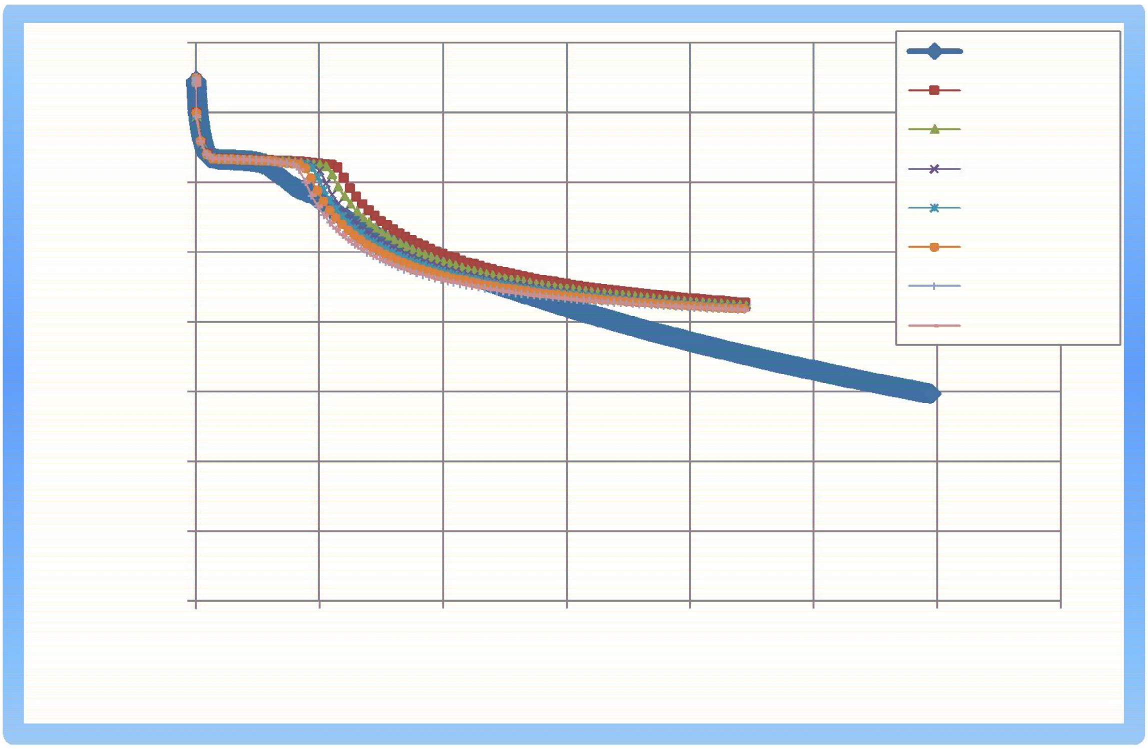
Εικόνα 23: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 43-49.



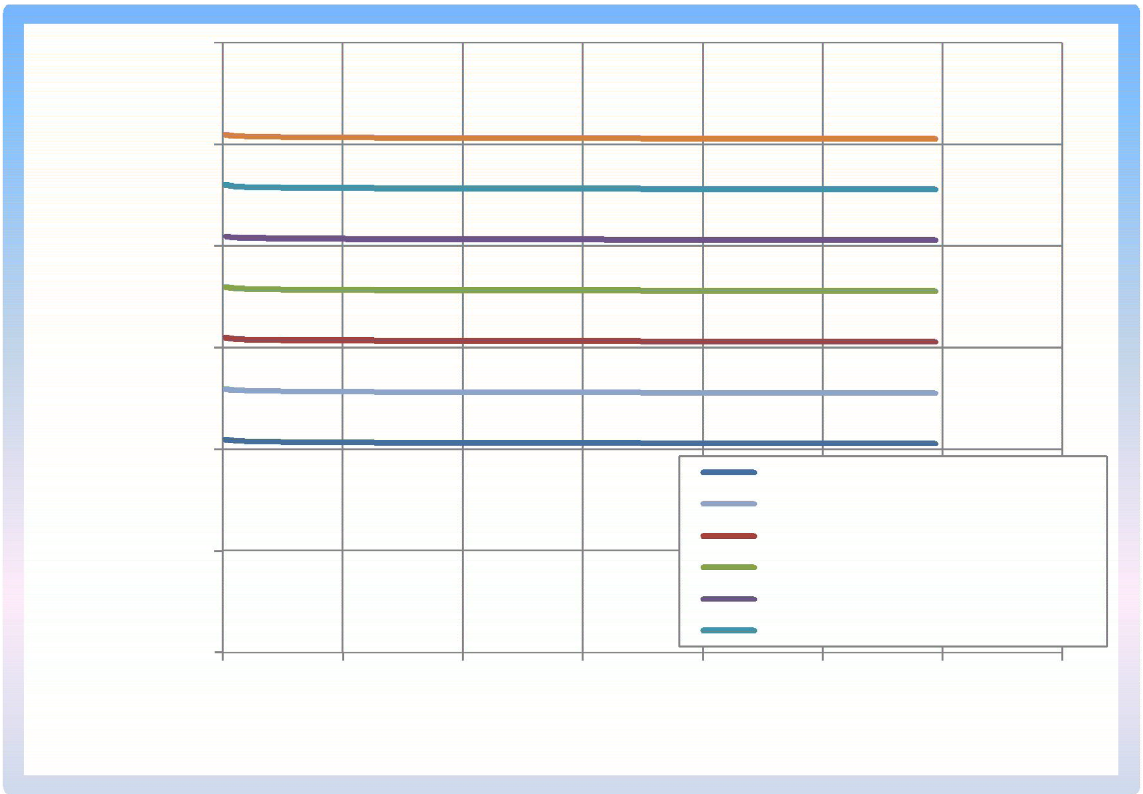
Εικόνα 24: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (43-49).



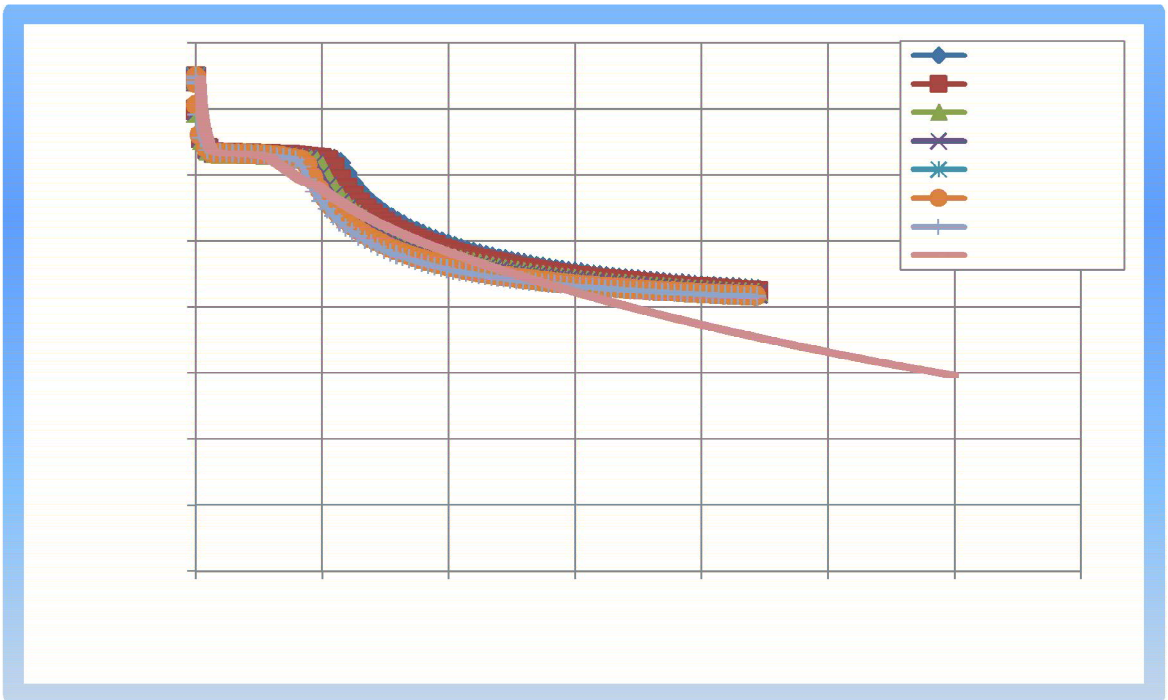
Εικόνα 25: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 50-56.



Εικόνα 26: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (50-56).



Εικόνα 27: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Kos_ 57-63.



Εικόνα 28. α: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ (57-63).

Συμπεράσματα 3ης σειράς προσομοιώσεων

Από τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ξεκάθαρα η βελτίωση στη σύγκλιση των προσομοιωμένων καμπύλων απόψυξης με αυτή της πειραματικής για μεγάλες τιμές τις παραμέτρου *c*.

Συμπερασματικά λοιπόν, από όλη τη σειρά προσομοιώσεων *Kos_*, προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου c, τόσο μεγαλύτερη είναι η σύγκλιση των προσομοιωμένων καμπύλων απόψυξης με την πειραματική. Τι γίνεται όμως με τις άλλες δύο παραμέτρους;

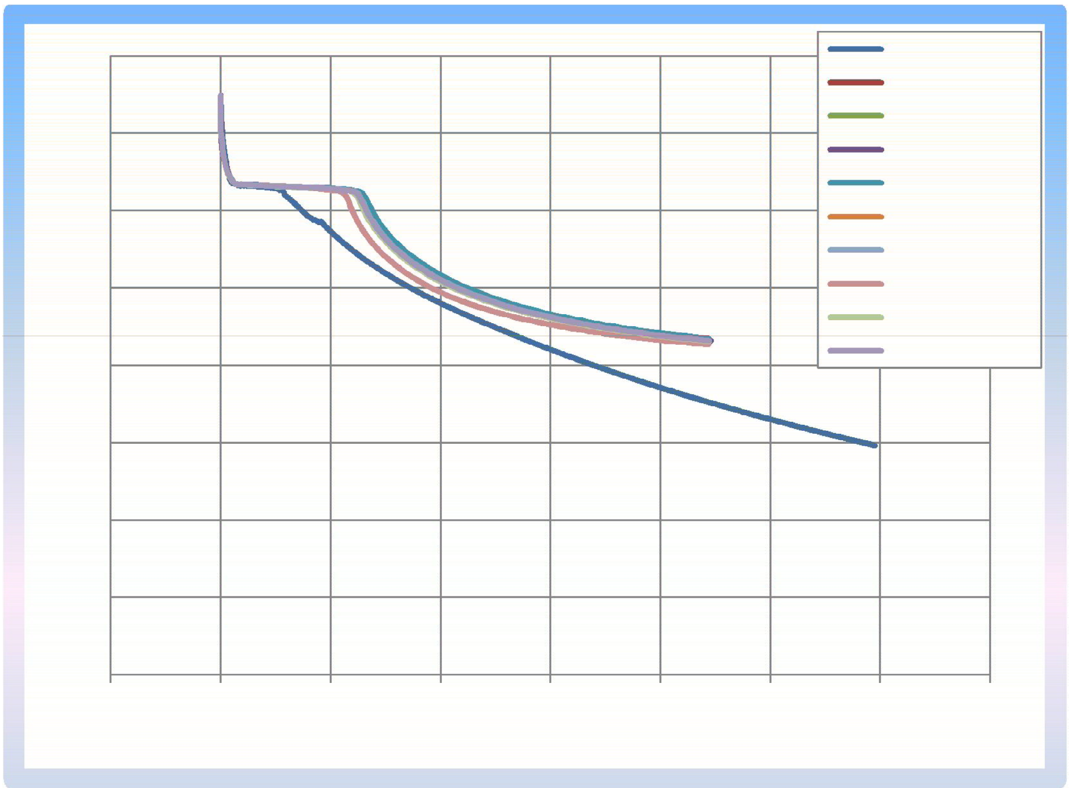
Η παράμετρος b επηρεάζει το ρυθμό μείωσης του συντελεστή $htc = at^{-b} + c$. Γενικά για τις τιμές $b = [0.1 \quad 0.6 \quad 1.2]$, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου b τόσο γρηγορότερη είναι η πτώση του Σ.Μ.Θ. Αντίθετα, όσο μικρότερη τιμή έχει η παράμετρος *b,* ο Σ.Μ.Θ παρουσιάζει πολλή μικρή μεταβολή , καθόλη τη διάρκεια της απόψυξης – τείνει δηλ. να παραμένει σε τιμές πολύ κοντα στην *αρχική τιμή του*.

Η *αρχική τιμή* του συντελεστή δεν καθορίζεται μόνο από την παράμετρο *c*, αλλά και από την παράμετρο *a*. Αυτό προκύπτει από την ίδια τη μορφή του Σ.Μ.Θ που είναι εκθετική. Στην αρχή της απόψυξης , $t \to 1 \ \sec$, ο Σ.Μ.Θ παίρνει τιμή *a+c*.

$$\lim_{t \to 1} \left(at^{-b} + c \right) = a + c$$

Απομονώνουμε σε πρώτη φάση λοιπόν σε ένα ενιαίο διάγραμμα τις καμπύλες απόψυξης που λάβαμε από τη σειρά προσομοιώσεων ***Kos_*** , για σταθερή τιμή της παραμέτρου $c = 3000$, ώστε να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις άλλες δύο παραμέτρους (*a*,*b*) και να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

	$htc = at^{-b} + c$ *(Σειρά προσομοιώσεων Kos_για c=3000)*		
α/α	a	b	c
*Kos4_*	200	0,1	3000
*Kos7_*	200	0,6	3000
*Kos10_*	200	1,2	3000
*Kos13_*	1200	0,1	3000
*Kos16_*	1200	0,6	3000
*Kos19_*	1200	1,2	3000
*Kos22_*	2000	0,1	3000
*Kos25_*	2000	0,6	3000
*Kos28_*	2000	1,2	3000



Εικόνα 29: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Kos_ , με σταθερή τιμή της παραμέτρου c=3000.

Στο παραπάνω διάγραμμα, όπου όλες οι καμπύλες απόψυξης έχουν προκύψει από τον εκθετικό Σ.Μ.Θ με σταθερή παράμετρο *c=3000*, η καμπύλη η οποία προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική είναι αυτή της προσομοίωσης ***Kos22_ .***

Οι τιμές *a,b,c* για την προσομοίωση αυτή είναι:

$$a = 2000$$

$$b = 0.1$$

$$c = 3000$$

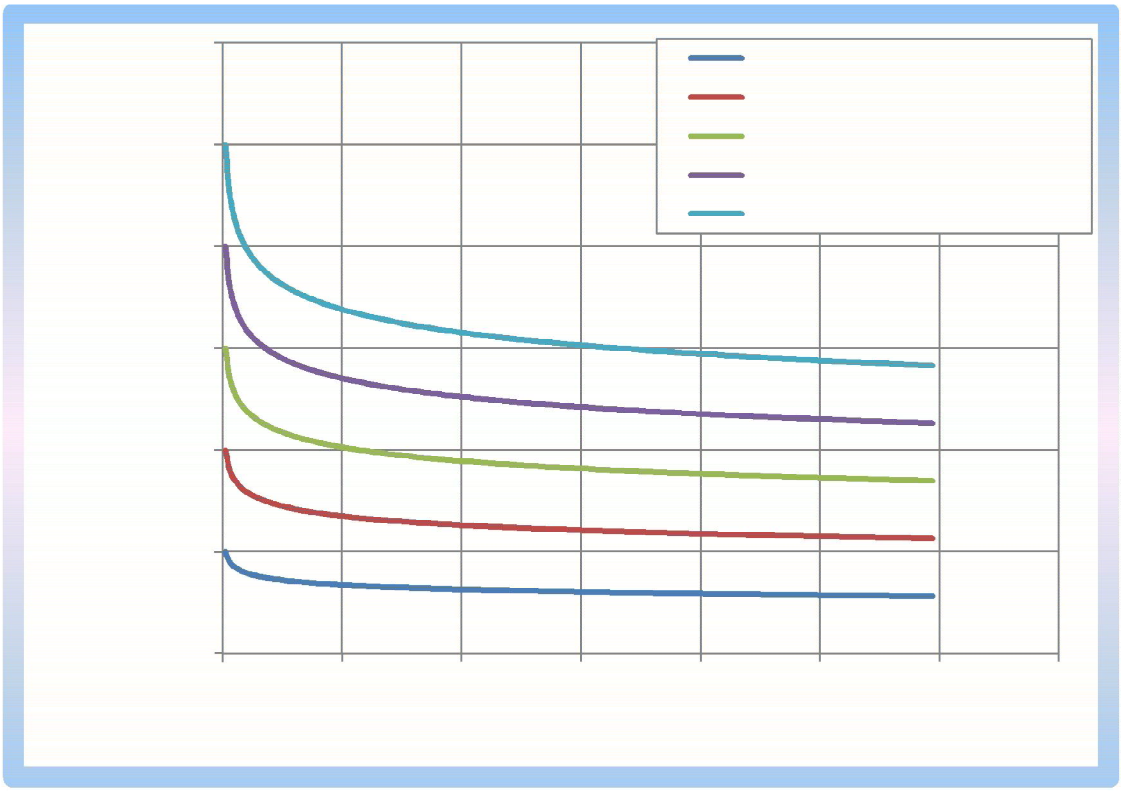
Είναι προφανές ότι η τιμή της παραμέτρου *a,* που μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα είναι η *μεγαλύτερη* των τριών που έχουμε επιλέξει.

Από την άλλη, για τις τιμές της παραμέτρου b που έχουμε δώσει, την καλύτερη προσέγγιση μας δίνει η *b=0.1*. Βέβαια, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι, όπως φαίνεται κι από τα παραπάνω διαγράμματα, η παράμετρος b αν και επηρεάζει ελαφρά την κλίση της καμπύλης απόψυξης στο 3^{o} στάδιο, δεν συμβάλλει δραστικά στην αλλαγή των καμπύλων σε όλη τη διαδικασία της απόψυξης. Παρόλα αυτά σε μια πρώτη προσέγγιση η τιμή b=0.1 μας δίνει τα καλύτερα μέχρι τώρα αποτελέσματα.

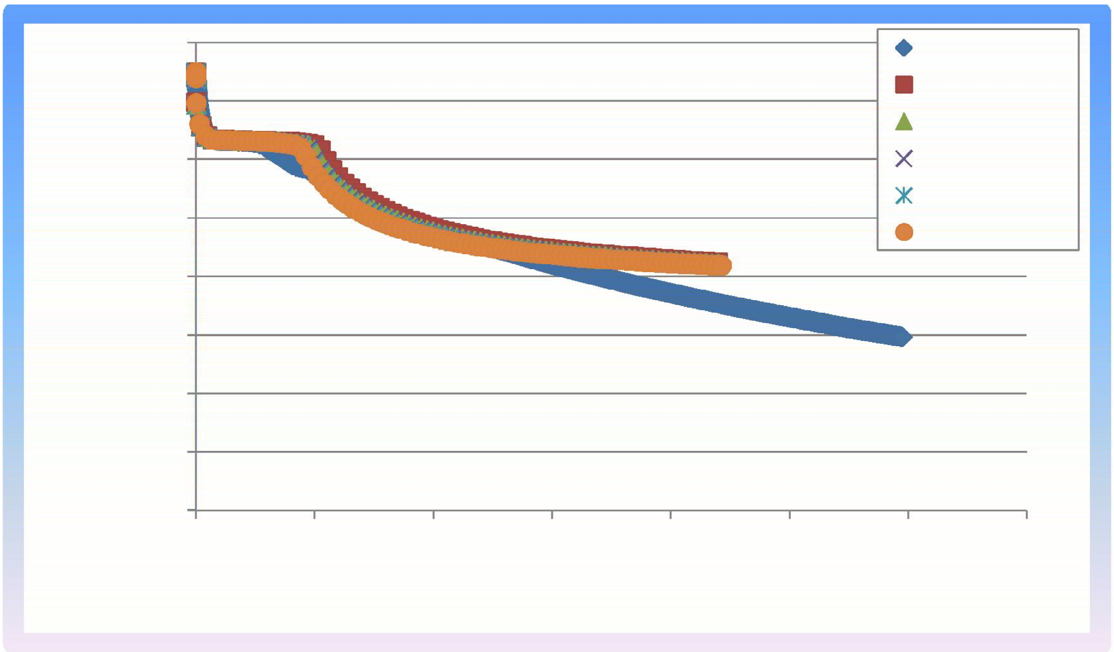
Σε μια ακόμη γενικότερη προσέγγιση, οι προσομοιώσεις δίνουν καλύτερα αποτελέσματα όταν το άθροισμα των παραμέτρων *a+c* είναι μεγάλο και όταν ο ρυθμός μείωσης του εκθετικού Σ.Μ.Θ κατά τη διάρκεια της απόψυξης είναι μικρός. Από την άλλη όσο μικραίνει η σταθερά *b*, τόσο ο Σ.Μ.Θ τείνει να γίνει σταθερός και ίσος με το άθροισμα *a+c.* Για να αποφύγουμε λοιπόν πολύ μικρές τιμές της παραμέτρου *b* , οι οποίες θα έδιναν έναν σχεδόν σταθερό Σ.Μ.Θ, κρατάμε ως βέλτιστη τιμή την **b=0.1**. Από τη σύγκριση άλλωστε των προσομοιώσεων Kos22_, Kos25_, Kos28_, όπου οι τιμές a, c είναι σταθερές και ίσες με 2000 και 3000 αντίστοιχα, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η καμπύλη η οποία προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική είναι αυτή για *b=0.1,* ενώ για *b=0.6* και *b=1.2* έχουμε σχεδόν πανομοιότυπες καμπύλες οι οποίες αποκλίνουν από την πρώτη.

Στην επόμενη σειρά προσομοιώσεων δίνουμε ακόμα μεγαλύτερες τιμές στις σταθερές a και c έτσι ώστε το άθροισμα *a+c* να είναι μεταξύ *6000* και *12000* , ενώ παράλληλα κρατάμε σταθερή την παράμετρο *b* και ίση με 0.1.

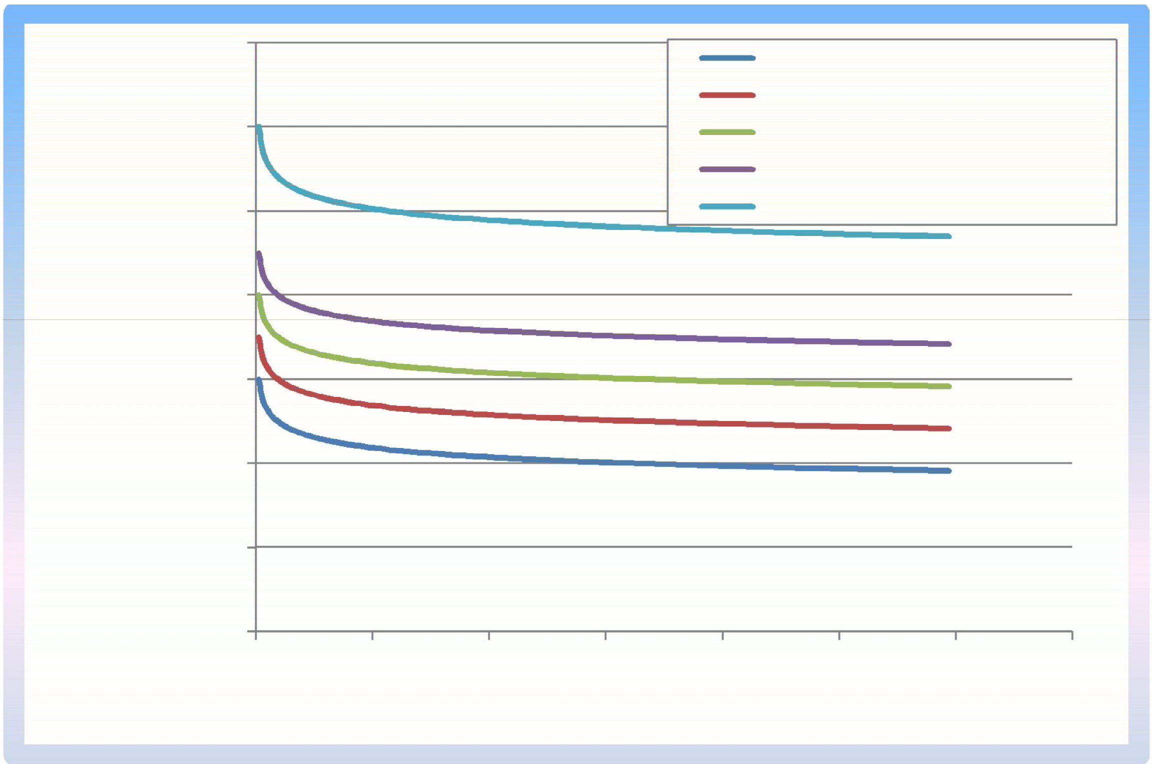
4η σειρά προσομοιώσεων



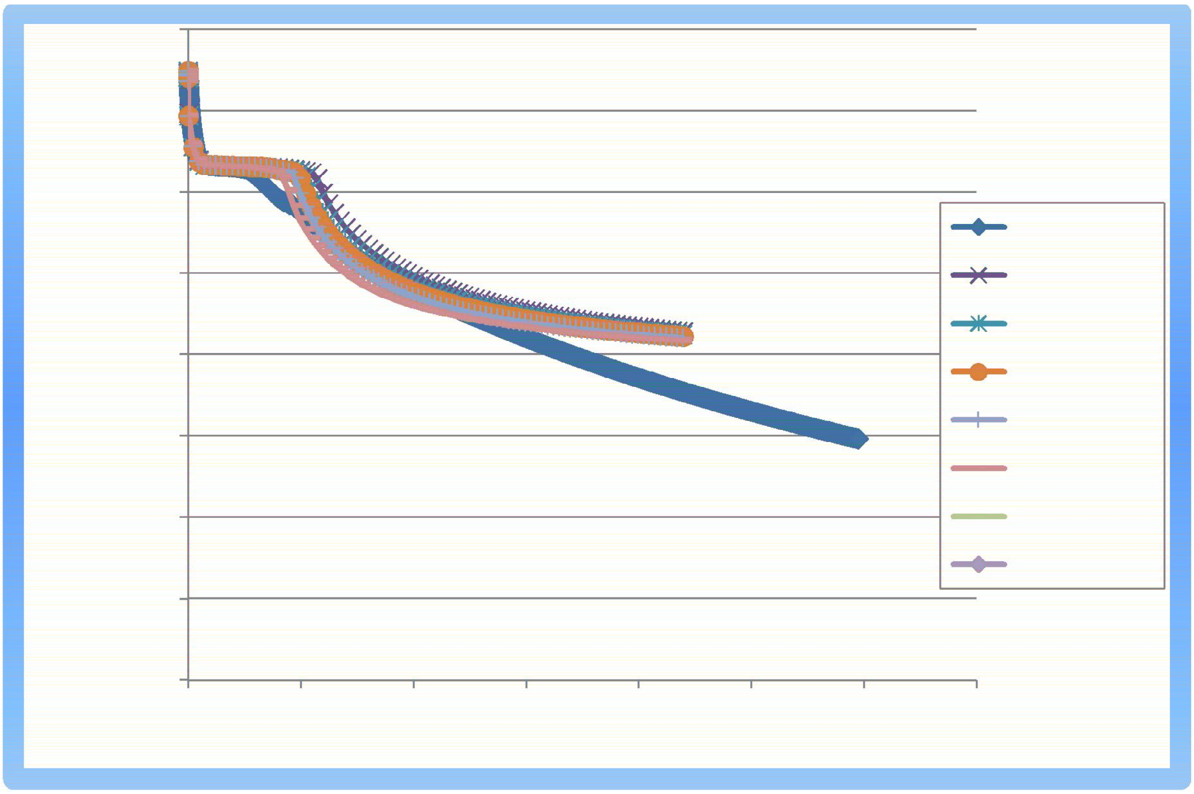
Εικόνα 30: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Nti_ 1-5.



Εικόνα 30: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Nti_ (1-5).



Εικόνα 31: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Nti_ 6-10.



Εικόνα 32 Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Nti_ (6-10).

Συμπεράσματα 4ης σειράς προσομοιώσεων

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι καμπύλες απόψυξης των προσομοιώσεων βελτιώνονται αυξάνοντας όχι μόνο την παράμετρο *c* αλλά και την παράμετρο *α.*

Αν συγκρίνουμε τις προσομοιώσεις ***Kos_(29-63)*** (με μικρή τιμή παραμέτρου *α* και μεγάλη *c*), με τις προσομοιώσεις ***Nti _(1-10),*** (με μεγάλες τιμές και για την *α* και για τη *c)* φαίνεται ότι ενώ και στις δύο έχουμε παρόμοιο *αρχικό Σ.Μ.Θ*, λόγω του αθροίσματος *a+c*, οι πρώτες παρουσιάζουν απότομη κύρτωση στην καμπύλη απόψυξης ενώ στις δεύτερες η κύρτωση που παρατηρείται είναι αρκετά μικρότερη.

Οπότε, ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα για την επίτευξη καλής σύγκλισης μεταξύ των προσομοιωμένων καμπύλων με την πειραματική είναι η επιλογή παραμέτρων α, c τέτοιων ώστε το άθροισμα τους να κυμαίνεται στην περιοχή 5000 < a+c < 10000 αλλά και οι τιμές των δυο παραμέτρων ξεχωριστά να μην απέχουν περισσότερο από 4000.

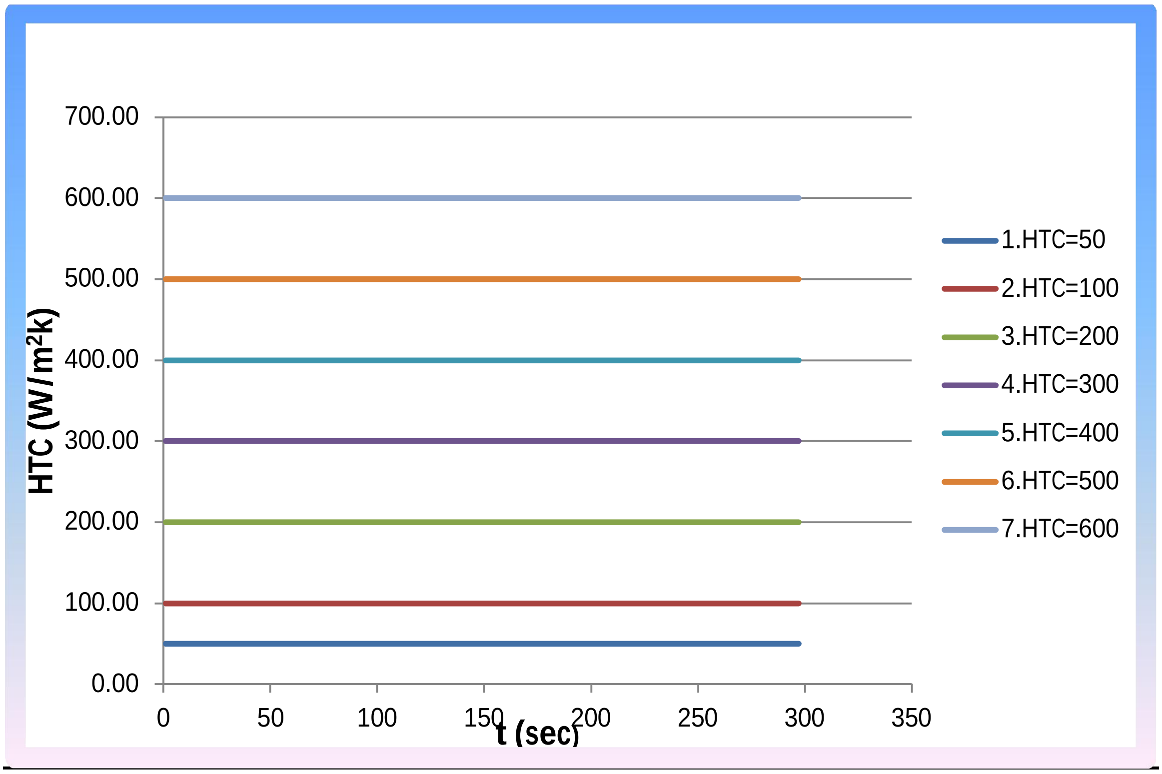
Από τις δυο τελευταίες σειρές προσομοιώσεων, μεγαλώνοντας τις τιμές a και c, η κλίση των προσομοιωμένων καμπύλων απόψυξης δεν αλλάζει στο 3ο στάδιο , σε σχέση με τις καμπύλες απόψυξης που λάβαμε από τη σειρά προσομοιώσεων *Val_ .* Εξαιτίας αυτής της παρατήρησης θα παραμετροποιήσουμε το συντελεστή διαφορετικά. Συγκεκριμένα θα παραμετροποιήσουμε το συντελεστή εκθετικά, όπως κάναμε παραπάνω, μέχρι και το 2ο στάδιο, χρησιμοποιώντας τιμές για τις παραμέτρους που μας δίνουν τη βέλτιστη σύγκλιση καμπύλων απόψυξης, , και ακολούθως θα του δώσουμε σταθερή τιμή, $htc = c$.

5η σειρά προσομοιώσεων

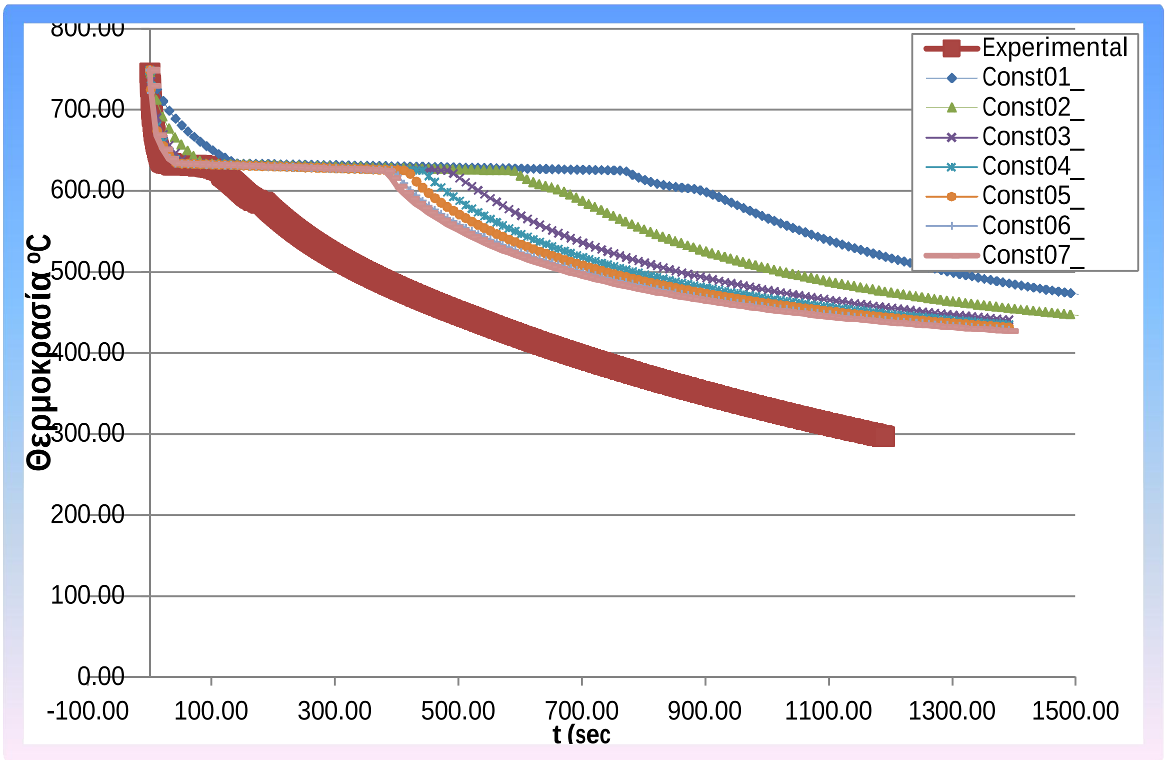
Η εύρεση της σταθερής τιμής όμως του συντελεστή θέλει διερεύνηση. Γι'αυτό θα πραγματοποιήσουμε σειρά προσομοιώσεων με διάφορες σταθερές τιμές ώστε να εξάγουμε κάποια συμπεράσμα από τις καμπύλες απόψυξης που θα προκύψουν και να μπορέσουμε έτσι να παραμετροποιήσουμε σωστά το Σ.Μ.Θ.Στη σειρά προσομοιώσεων ***Const_*** που ακολουθεί δοκιμάζουμε τιμές για τη σταθερή c από

$$c = 50\, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K} \text{ εως και } c = 12000\, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K}$$

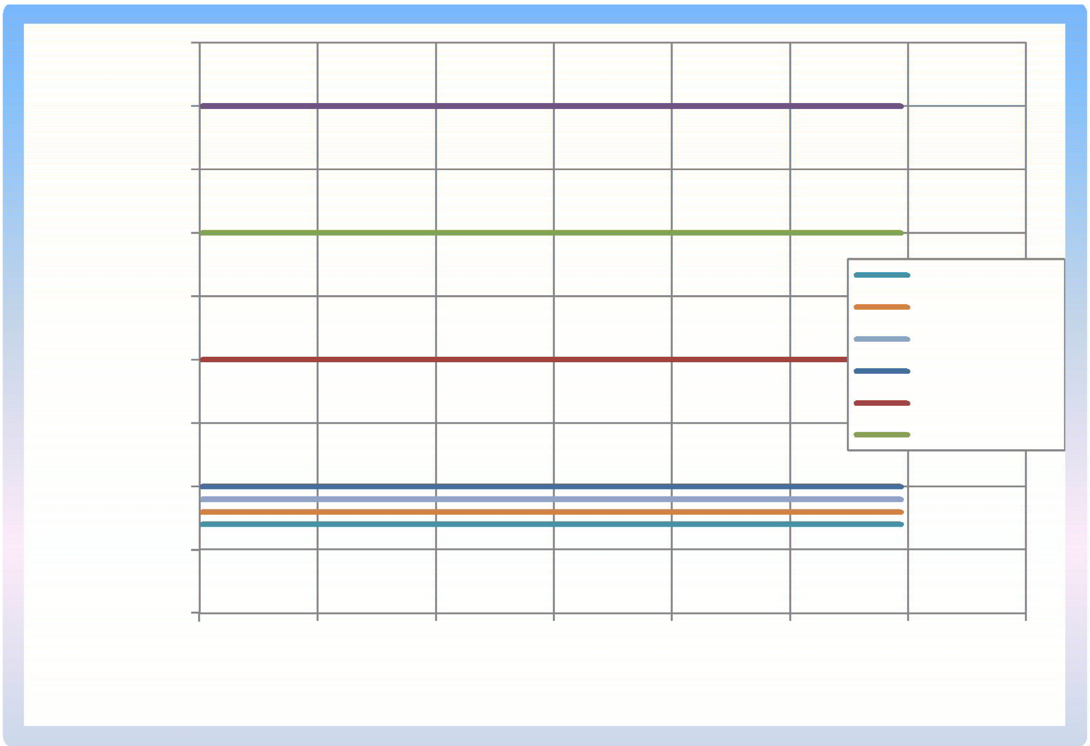
$htc = c$			
Simulation	*htc=c*	*Simulation*	*htc=c*
*Const1_*	*50*	*Const12_*	*2000*
*Const2_*	*100*	*Const13_*	*3000*
*Const3_*	*200*	*Const14_*	*4000*
*Const4_*	*300*	*Const15_*	*5000*
*Const5_*	*400*	*Const16_*	*6000*
*Const6_*	*500*	*Const17_*	*7000*
*Const7_*	*600*	*Const18_*	*8000*
*Const8_*	*700*	*Const19_*	*9000*
*Const9_*	*800*	*Const20_*	*10000*
*Const10_*	*900*	*Const21_*	*11000*
*Const11_*	*1000*	*Const22_*	*12000*



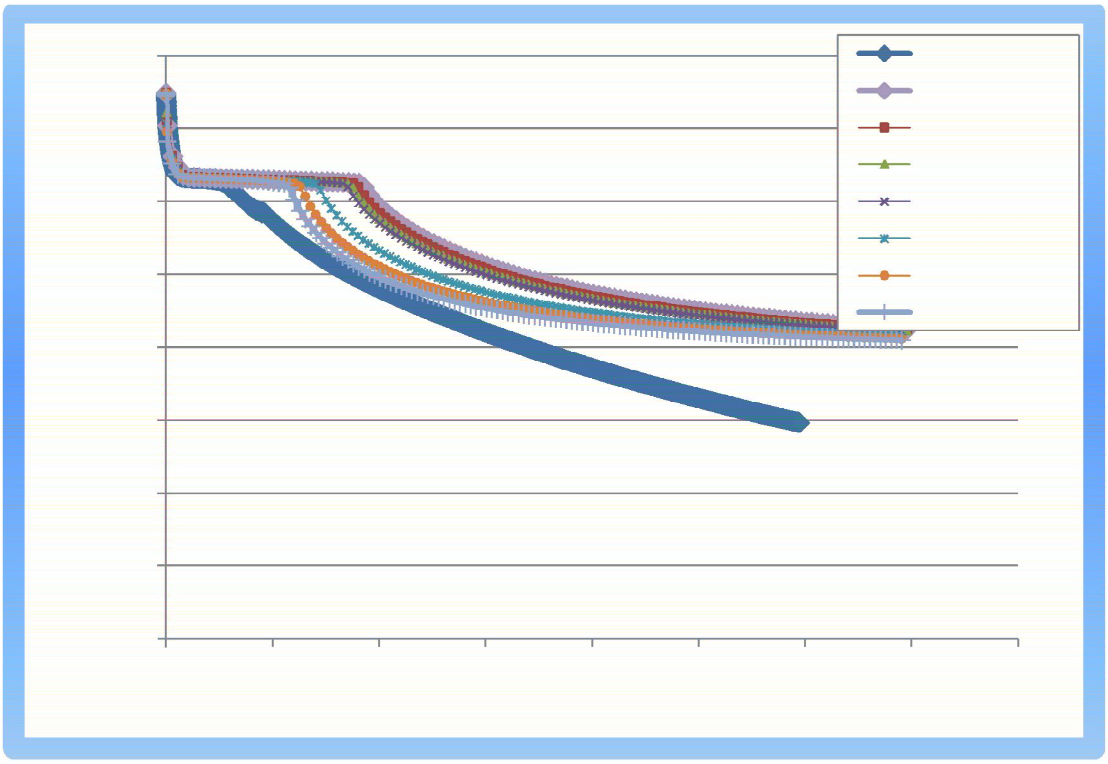
Εικόνα 33: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Const_ 1-7.



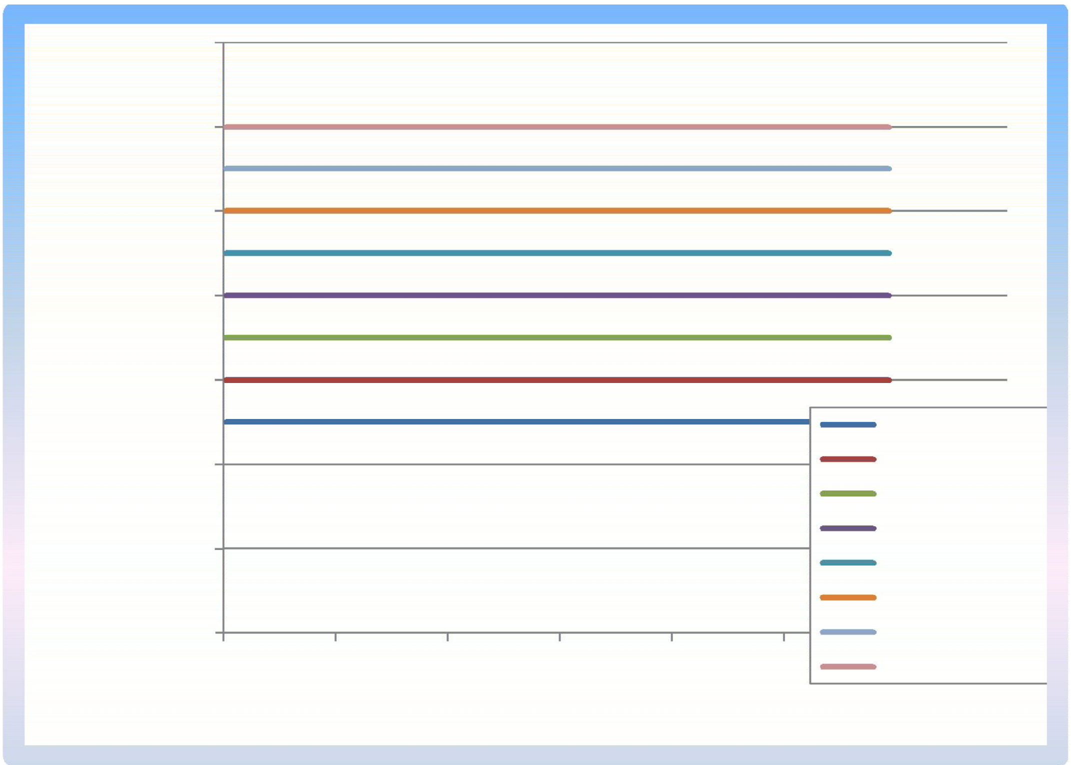
Εικόνα 34: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Const_ (1-7).



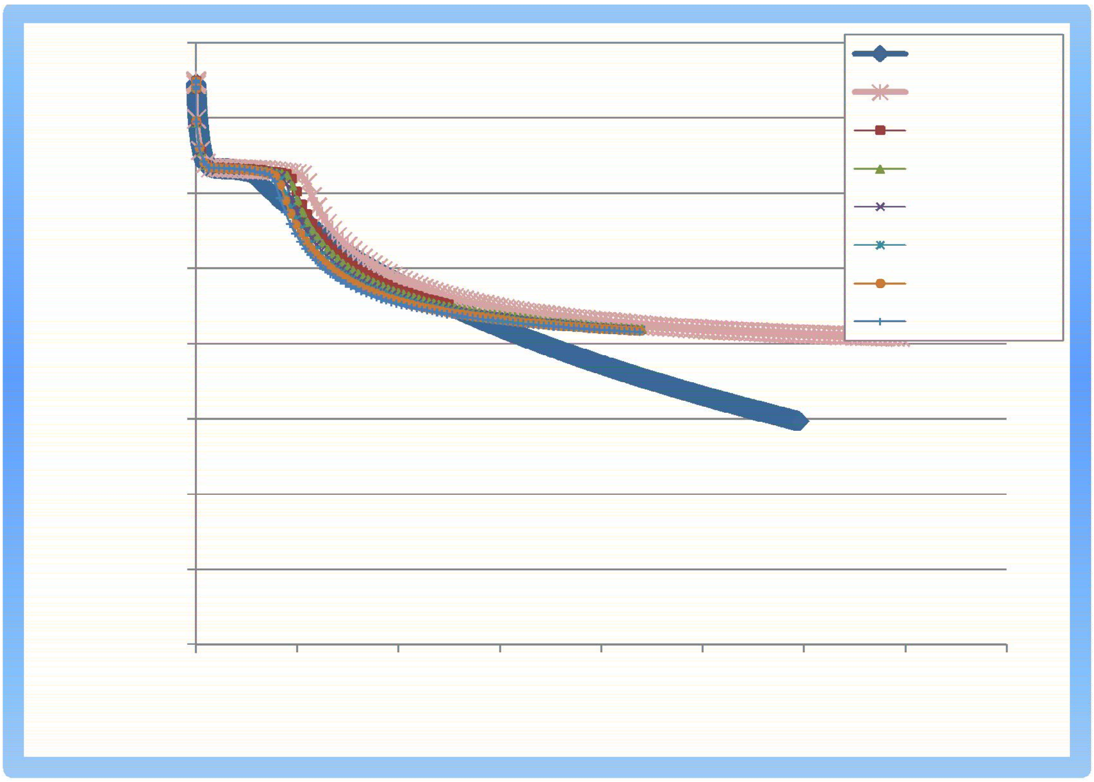
Εικόνα 35: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Const_ 8-14.



Εικόνα 36: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Const_ (8-14).



Εικόνα 37: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Const_ 15-22



Εικόνα 38: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Const_ (15-22).

Συμπεράσματα 5ης σειράς προσομοιώσεων

Από τις παραπάνω καμπύλες απόψυξης παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές του συντελεστή, επιμηκύνεται αρκετά η περιοχή της στερεοποίησης, ενώ αντίθετα για μεγαλύτερες τιμές του, περιορίζεται αρκετά το 2ο στάδιο της απόψυξης (περιοχή στερεοποίησης) με αντίτιμο όμως την αλλάγή στην κλίση των καμπύλων στο 3ο στάδιο.

Τα συμπεράσματα λοιπόν είναι παρόμοια με αυτά στα οποία καταλήξαμε και προηγουμένως μελετώντας ττις τιμές που παίρνει η παράμετρος *c* στην εκθετική μορφή του συντελεστή.

Συνεπώς μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο Σ.Μ.Θ, στο 1ο και στο 2ο στάδιο της απόψυξης παίρνει μεγάλες τιμές $c = 5000\, W/m^2 \cdot K \; - \; 10000\, W/m^2 \cdot K$. Αντίθετα μικρές τιμές του Σ.Μ.Θ σε αυτά τα χρονικά διαστήματα δε δίνουν ικανοποιητικές καμπύλες απόψυξης. Μικρές τιμές του Σ.Μ.Θ στο 1ο και 2ο στάδιο της απόψυξης επιμηκύνουν πολύ το 2ο στάδιο.

Αντίθετα, όπως παρατηρείται στις προσομοιώσεις ***Const_1-8*** μικρές τιμές του Σ.Μ.Θ δίνουν πολύ ικανοποιητικό 3ο στάδιο απόψυξης , όπου οι προσομοιωμένες καμπύλες απόψυξης έχουν την ίδια κλίση με την πειραματική. Παρουσιάζονται απλά μετατοπισμένες δεξιότερα λόγω του παρατεταμένου 2ου σταδίου της απόψυξης.

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα λοιπόν θα κάνουμε σειρά προσομοιώσεων , παραμετροποιώντας αυτή τη φορά το Σ.Μ.Θ με τη μορφή

$$htc = \begin{cases} at^{-b} + c_1 , & 0 < t < 100 \sec \\ c_2 , & 100 < t \end{cases}$$

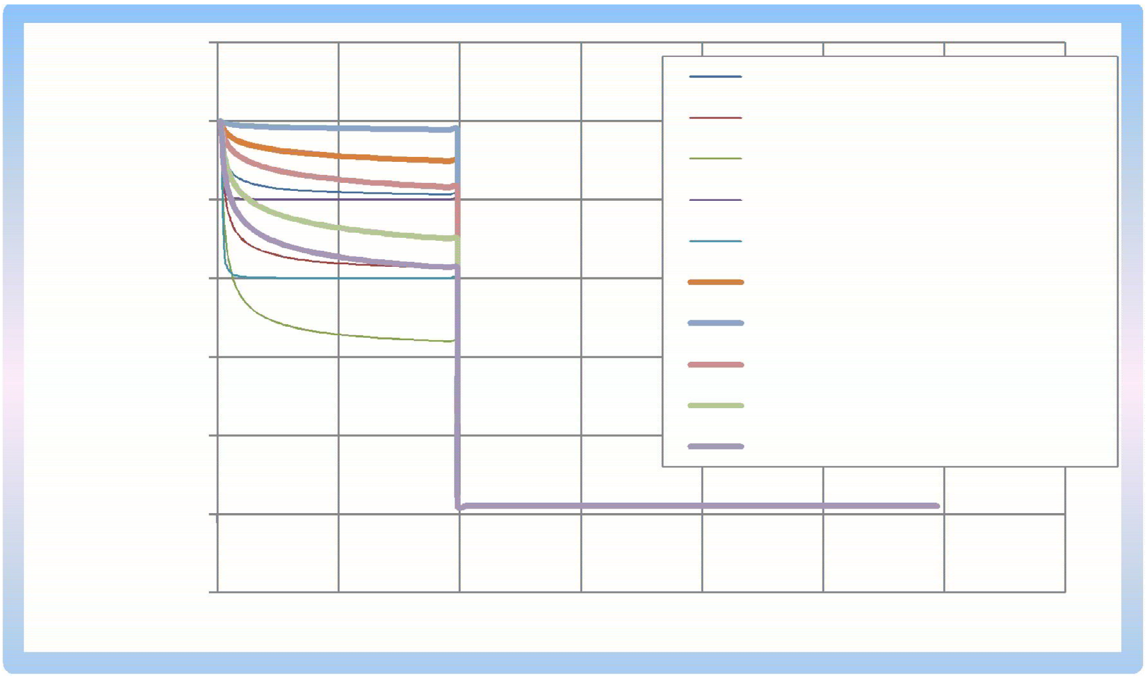
ώστε να παρατηρήσουμε τη μεταβολή του συναρτήσει του χρόνου σε διαφορετικές τιμές των παραμέτρων $a,\ b,\ c_{1,}\ c_2$, οι οποίες φυσικά δεν είναι τυχαίες αλλά βασίζονται στην ανάλυση η οποία έχει γινει μέχρι τώρα.

Στη σειρά προσομοιώσεων ***Tan_*** που ακολουθεί πραγματοποιούμε μια σειρά από 50 προσομοιώσεις στις οποίες οι παράμετροι $a,\ b,\ c_{1,}\ c_2$ μεταβάλλονται ως ακολούθως.

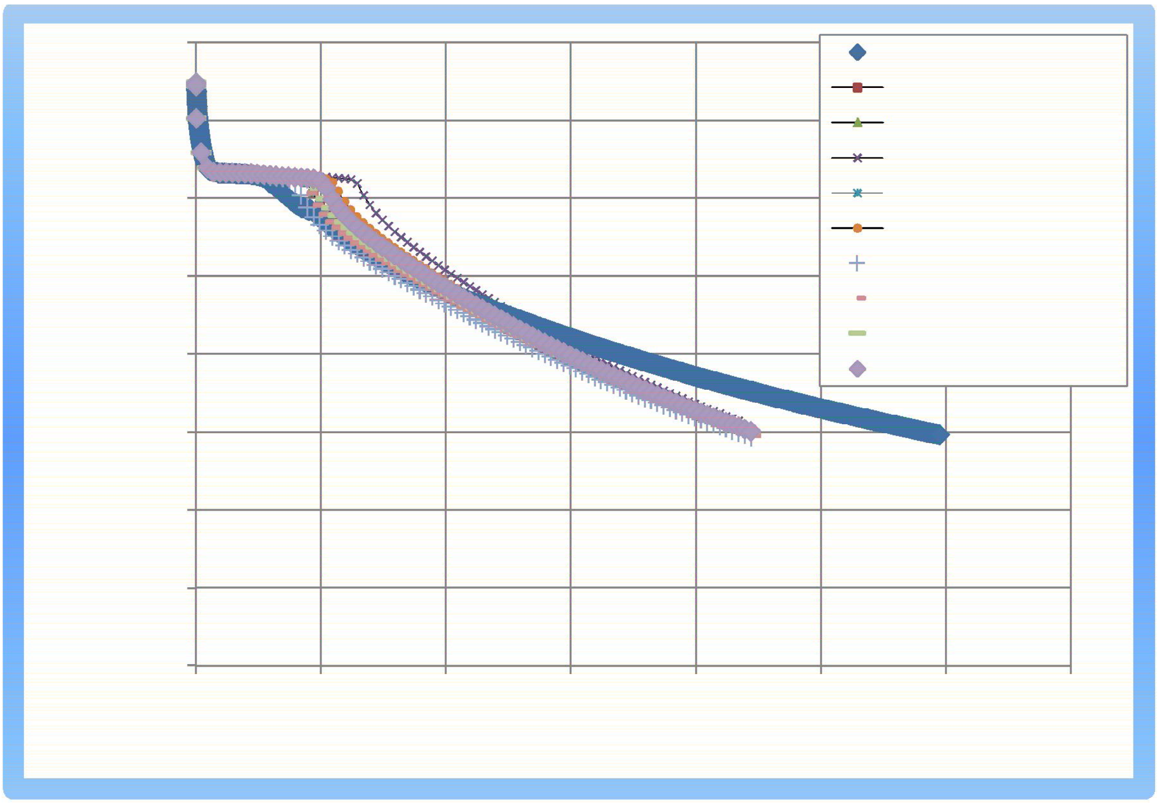
$$a = 1000,\ 2000,\ 2500,\ 3000,\ 4000$$
$$c_1 = 1000,\ 2000,\ 2500,\ 3000,\ 4000$$
$$b = 0.1,\ b = 0.6\ \ b = 2$$
$$c_2 = 100,\ 1000,\ 2000,\ 3000,\ 4000$$

Οι παράμετροι $a,\ c_1$ έχουν επιλέγει έτσι ώστε το άθροισμα τους να μας δίνει τιμή $a + c_1 = 5000$, αφού σύμφωνα με τα παραπάνω θέλουμε σχετικά μεγάλο αρχικό Σ.Μ.Θ, ενώ η παράμετρος *b* που όπως αναφέραμε προηγούμενα δεν επηρεάζει δραστικά την καμπύλη απόψυξης, έχει τις παραπάνω τιμές.

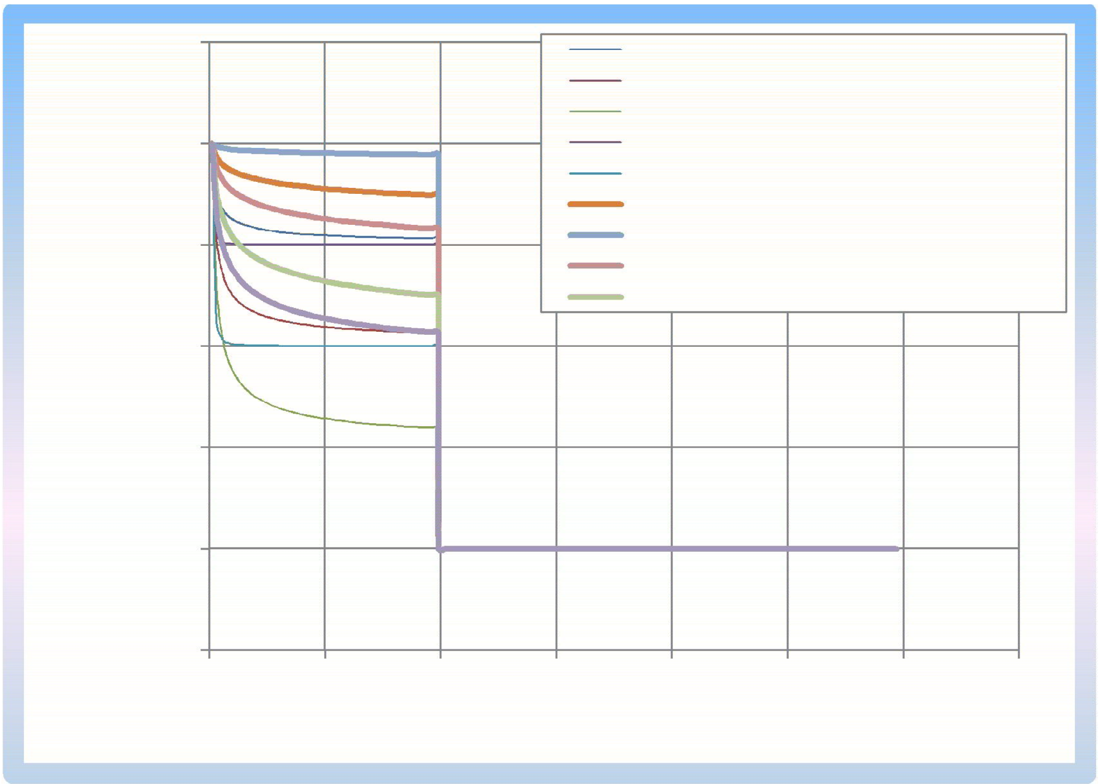
6η σειρά προσομοιώσεων



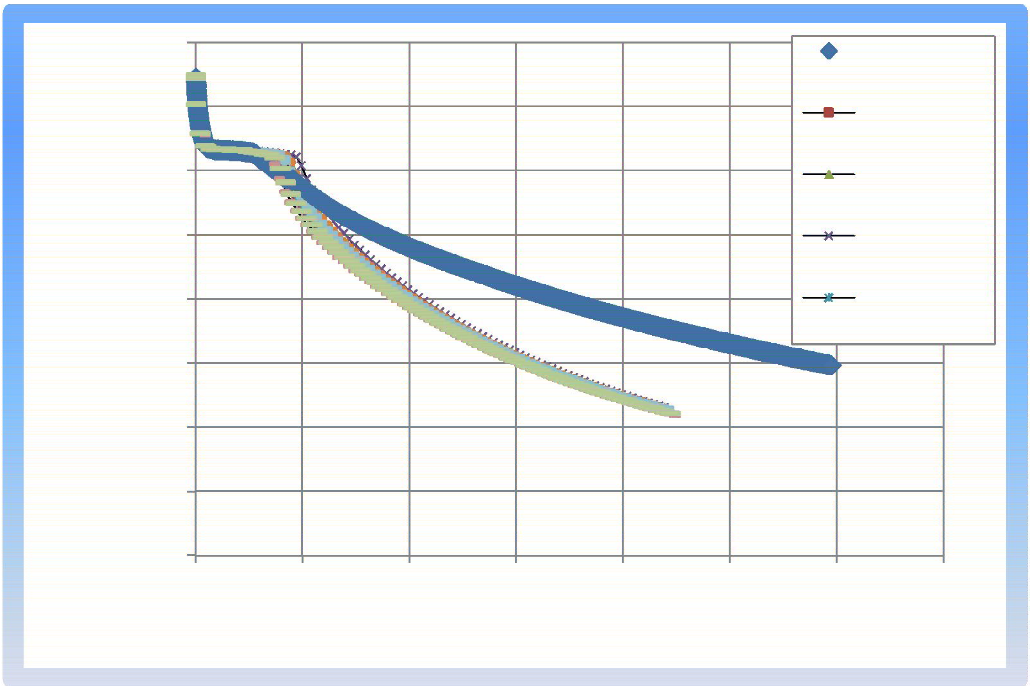
Εικόνα 39 : Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Tan_ 1-10.



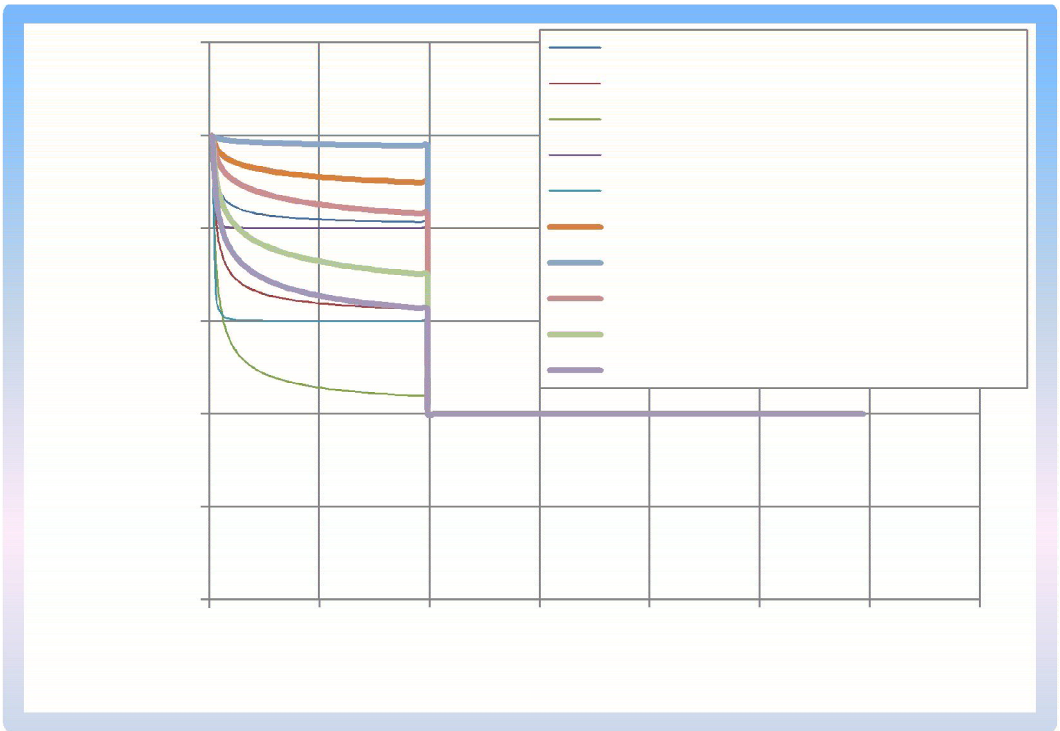
Εικόνα 40 : Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Tan_1-10.



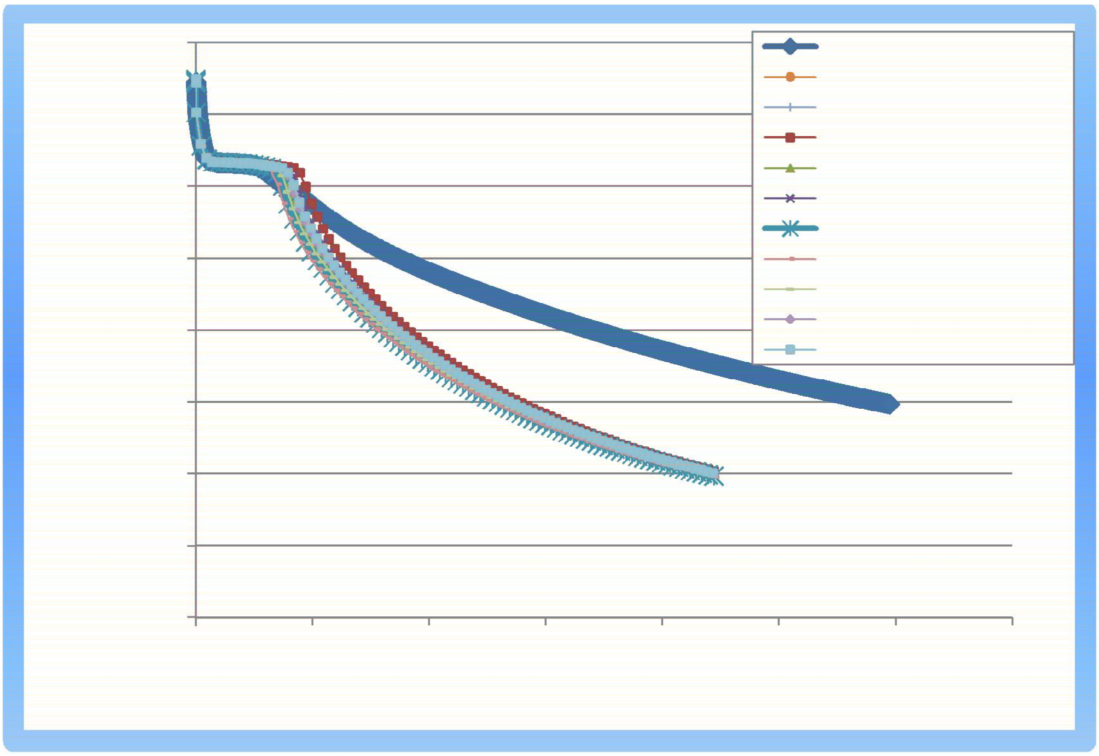
Εικόνα 41: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Tan_ 11-20.



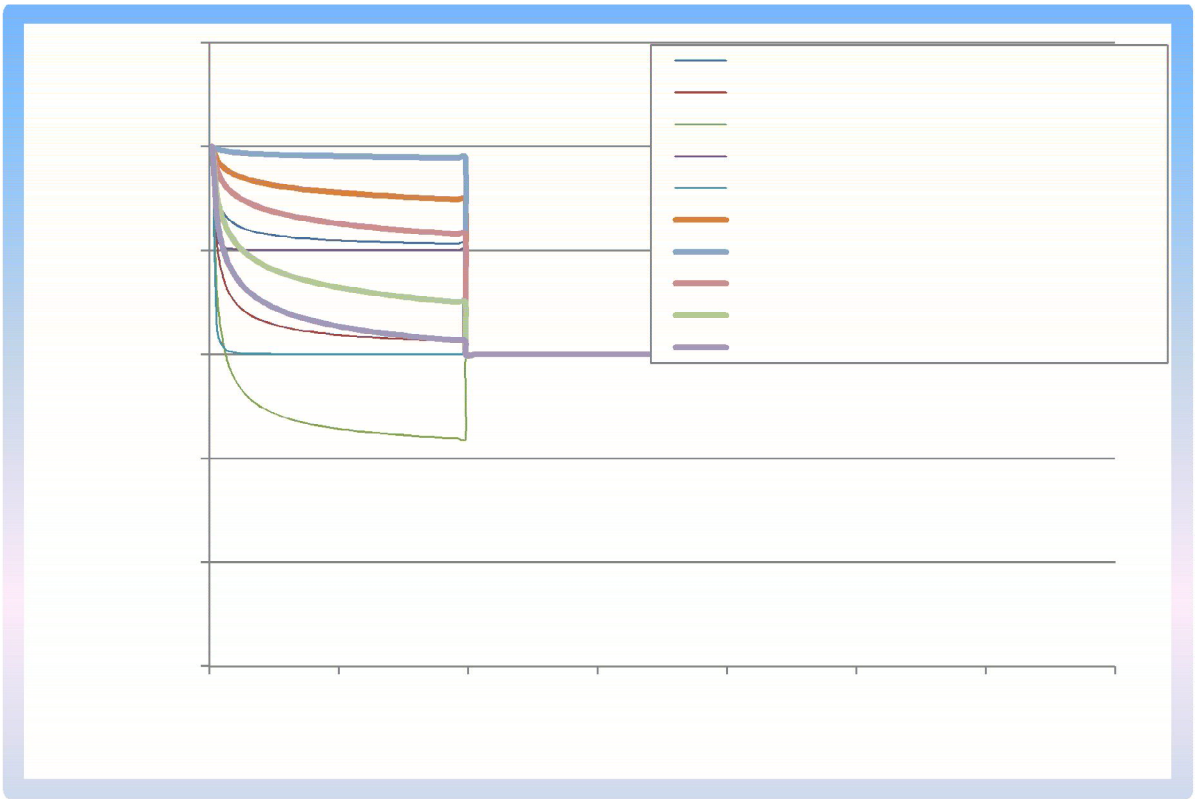
Εικόνα 42: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Tan_11-20.



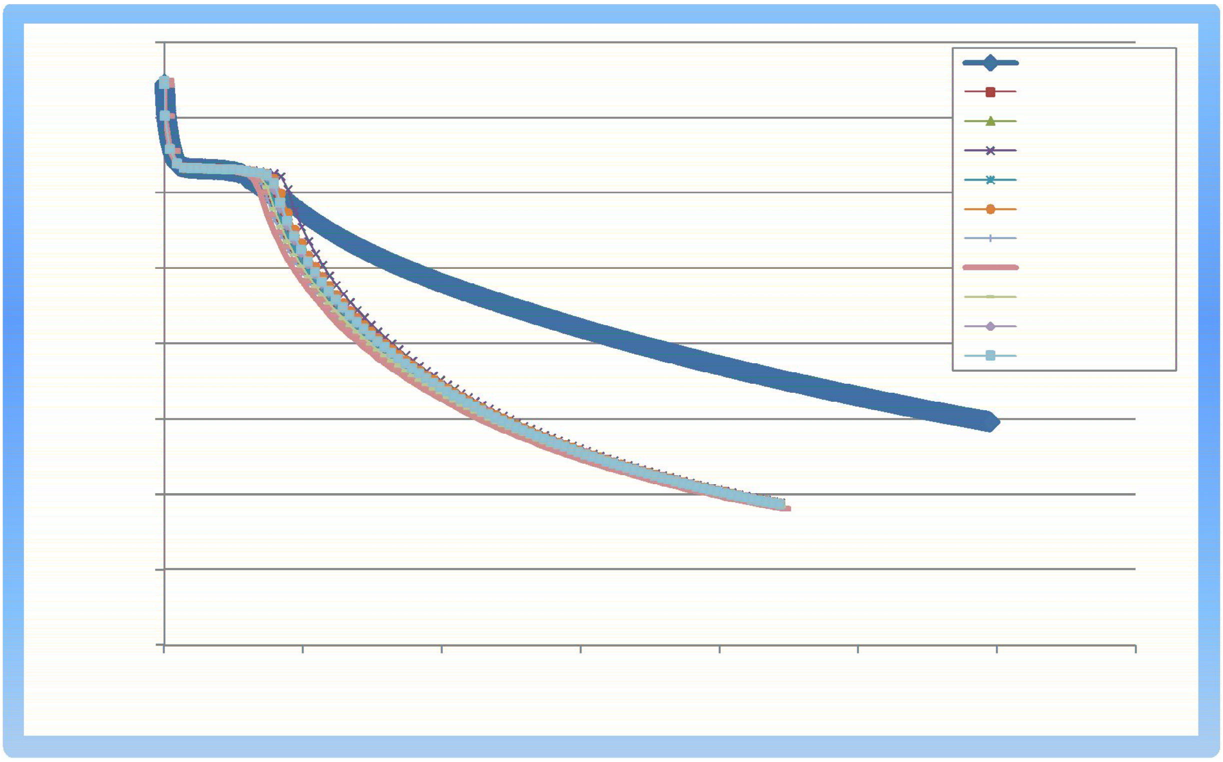
Εικόνα 43: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Tan_ 21-30.



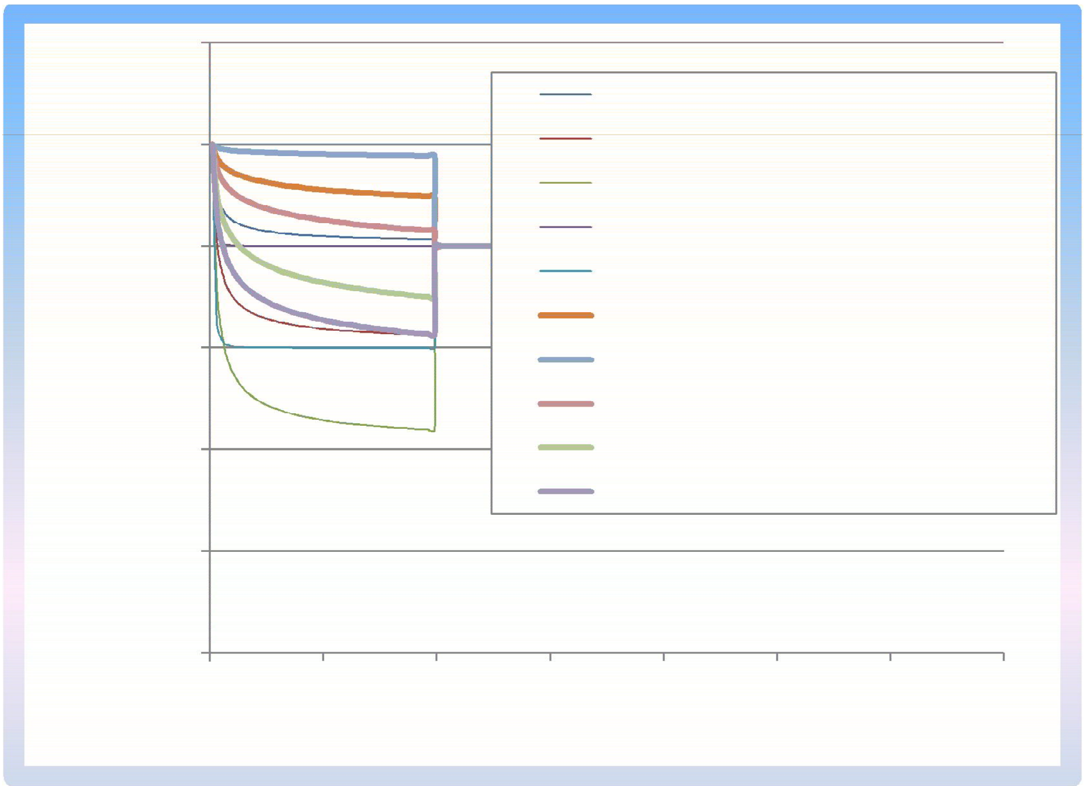
Εικόνα 44: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Tan_21-30.



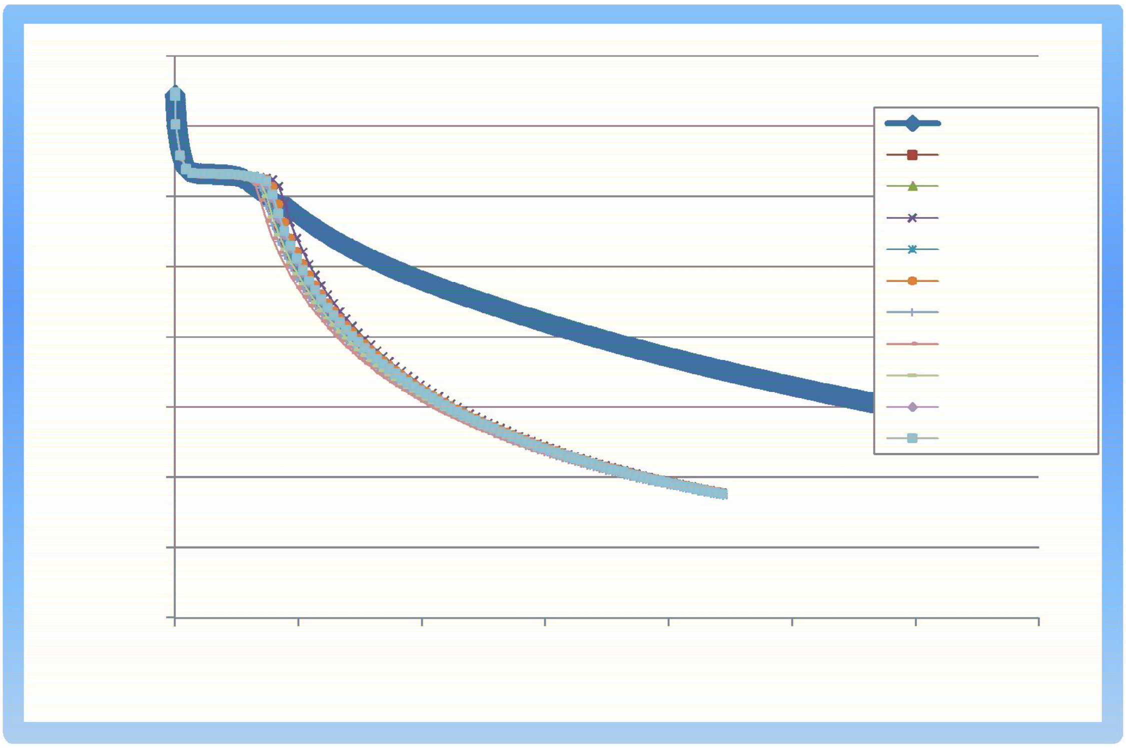
Εικόνα 46: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Tan_ 31-40.



Εικόνα 47: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Tan_31-40.



Εικόνα 48: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Tan_ 41-50.



Εικόνα 49: Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Tan_41-50.

Συμπεράσματα 6ης σειράς προσομοιώσεων

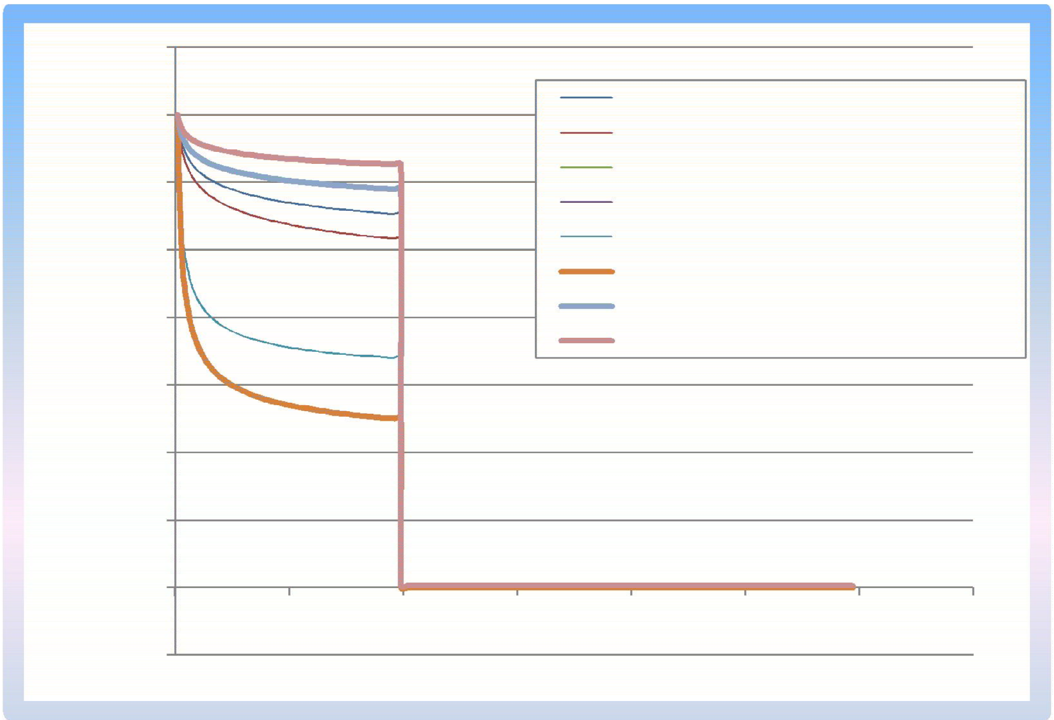
Στη σειρά προσομοιώσεων ***Tan_1-10*** βλέπουμε ότι οι προσομοιωμένες καμπύλες στο 1ο και 2ο στάδιο της απόψυξης είναι σχεδόν πανομοιότυπες με αυτές της πειραματικής , ενώ για πρώτη φορά έως τώρα πετυχαίνουμε τόσο καλή σύγκλιση στο 3ο στάδιο της απόψυξης.

Γενικότερα από όλη τη σειρά προσομοιώσεων *Tan_* συνάγουμε ότι ο εκθετικός Σ.Μ.Θ στο 1ο και 2ο στάδιο της απόψυξης δίνει πάρα πολύ ικανοποιητικά απότελέσματα. Από την άλλη, οι διαφορετικές τιμές του Σ.Μ.Θ μετά το στάδιο της στερεοποίησης, μεταβάλλουν την καμπύλη απόψυξης σε όλες τις προσομοιώσεις. Η καλύτερη σύγκλιση είναι αυτή για τις προσομοιώσεις ***Tan_1-10,*** στις οποίες μάλιστα παρατηρείται η καλύτερη σύγκλιση από όλες τις προσομοιώσεις έως τώρα. Οι τιμές του Σ.Μ.Θ κυμαίνονται στην περιοχή $htc = 100 - 1000 \, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot k}$. Αντίθετα όσο αυξάνεται η τιμή του Σ.Μ.Θ οι προσομοιωμένες καμπύλες αποκλίνουν περισσότερο. Για τις τιμές $htc = 2000 - 4000 \, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot k}$ οι κλίσεις των προσομοιωμένων καμπύλων απόψυξης εμφανίζουνε μεγάλες κυρτώσεις και αποκλίνουν από την πειραματική. Συμπαιρένουμε λοιπόν ότι για την καλύτερη σύγκλιση στο 3ο στάδιο της απόψυξης, ο Σ.Μ.Θ πρέπει να εχει όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή.

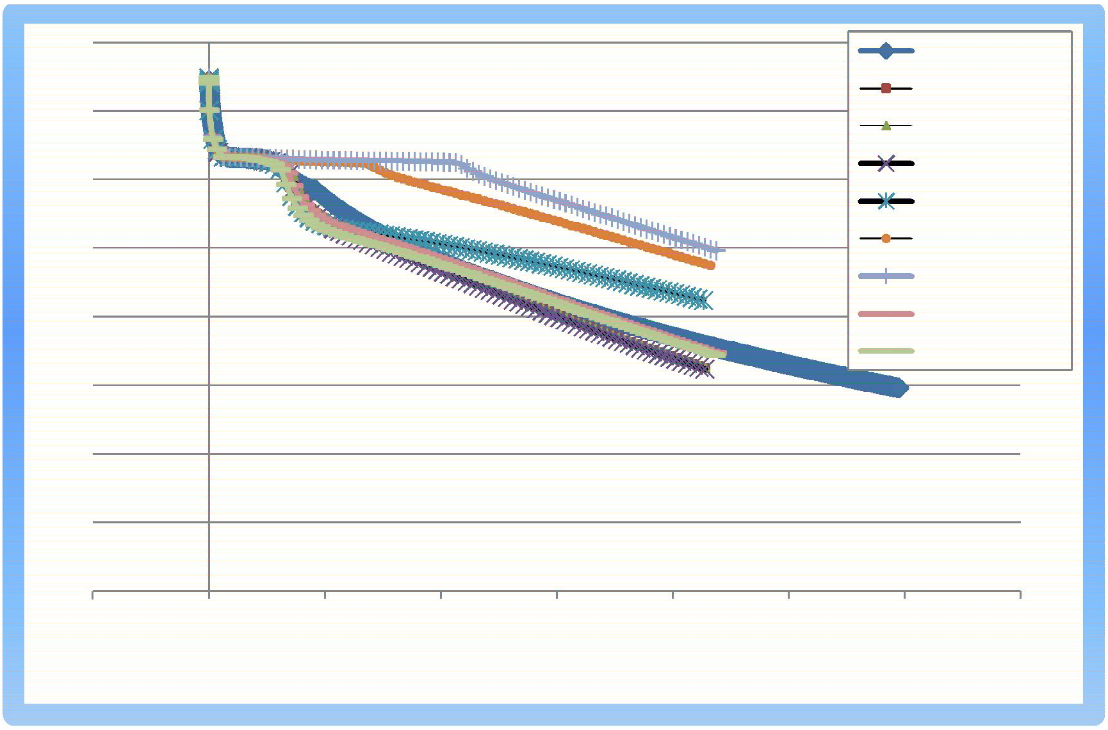
Με μια πιο φυσική εποπτεία της διαδικασίας της απόψυξης, στο 1ο στάδιο όπου το μέταλλο είναι ρευστό και έχει μεγάλη θερμοκρασία, η «αντίσταση» που συναντά η ροή θερμότητας που απάγεται από τα τοιχώματα του καλουπιού είναι μεγάλη λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας τηγμένου μετάλλου – εξωτερικό τοίχωμα καλουπιού. Επειδή ο Σ.Μ.Θ έχει την έννοια της «αντίστασης» που συναντά η ροή θερμότητας, θα έχει κι αυτός μεγάλη τιμή. Όταν στερεοποιηθεί το μέταλλο και σε θερμοκρασίες μικρότερες της solidus $T < 625^{o}C$ *, η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ στερεοποιημένου μεταλλου και εξωτερικού τοιχώματος καλουπιού έχει μειωθεί αρκετά με αποτέλεσμα η θερμοτητα να απάγεται με σταθερό ρυθμό, συναντώντας πολλή μικρότερη «αντίσταση» .*

Θα δοκιμάσουμε μερικές ακόμα προσομοιώσεις , δίνοντας αυτή τη φορά ακόμα χαμηλότερη τιμή στην παράμετρο c_2, έτσι ώστε να είναι $htc < 100 \, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot k}$ ενώ θα αυξήσουμε λίγο τις τιμές των a, c στην εκθετική μορφή του Σ.Μ.Θ. Στη σειρά προσομοιώσεων ***Fin_*** που ακολουθεί δοκιμάζουμε τους συντελεστές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	$htc = at^{-b} + c\ ,\ t \leq 100\sec$			$htc = c\ , t > 100\sec$
Simulation	a	b	C_1	C_2
*Fin1_*	4000	0.1	3000	50
*Fin2_*	5000	0.1	2000	50
*Fin3_*	3000	0.1	4000	50
*Fin4_*	2000	0.1	5000	10
*Fin5_*	4000	0.5	3000	10
*Fin6_*	5000	0.5	2000	10
*Fin7_*	3000	0.1	4000	30
*Fin8_*	2000	0.1	5000	30



Εικόνα 50: Η κατανομή των Σ.Μ.Θ συναρτήσει του χρόνου που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της σειράς Fin_1-8.



Εικόνα 51. Καμπύλες απόψυξης (θερμοκρασίας – χρόνου) που προέκυψαν για τις σειρές προσομοιώσεων Fin_1-8.

Στις προσομοιώσεις της σειράς ***Fin_*** πετυχαίνουμε την καλύτερη σύγκλιση από όλες τις προσομοιώσεις έως τώρα. Το 1ο και 2ο στάδιο της απόψυξης συγκλίνουν απόλυτα ενώ το 3ο στάδιο της προσομοίωσης σύγλίνει σχεδόν εξοκλήρου για τις δοκιμές ***Fin1_, Fin2_, Fin3_, Fin7_, Fin8_.*** Οι τιμές των συντελεστών που χρησιμοποιήσαμε σε αυτές τις πέντε προσομοιώσεις συνάδουν πλήρως με όλα όσα έχουμε προαναφέρει. Στο 1ο και 2ο στάδιο ο συντελεστής έχει μεγάλες τιμές ενώ στο 3ο στάδιο, όπου έχει στερεοποιηθεί πλήρως όλο το μέταλλο, ο συντελεστής αποκτά πλέον μικρή τιμή.

Από τις παραπάνω σειρές προσομοιώσεων προκύπτουν μερικά πρακτικά συμπεράσματα:

i. Στην προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης αλουμινίου με το ProCAST 2004.1 η παραμετροποίηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μπορεί να γίνει ως εξής : στο 1ο και 2ο στάδιο της απόψυξης ο συντελεστής έχει εκθετική μορφή $htc = at^{-b} + c$ με παραμέτρους a, c να έχουν τιμές τέτοιες ώστε ο αρχικός Σ.Μ.Θ $a + c$ να βρίσκεται στην περιοχή $5000 < a + c < 12000$ και η παράμετρος b να έχει μικρή τιμή . Χαρακτηριστική τιμή είναι η $b = 0.1$. Στο 3ο στάδιο, που είναι το στάδιο μετά το πέρας της στερεοποίησης ο συντελεστής παίρνει πλέον μικρή τιμή της τάξης των $30 \, {W}/{m^2 \cdot k} - 100 \, {W}/{m^2 \cdot k}$.

ii. Ο αρχικός Σ.Μ.Θ (IHTC) γενικά έχει μεγάλες τιμές. Αυτό συμφωνεί με το γεγονός ότι το τηγμένο μέταλλο που βρίσκεται σε μεγάλη θερμοκρασία (και έχει αρκετά μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά με το καλούπι) έχει πολύ καλή πρόσφυση με το καλούπι κι έτσι ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας είναι υψηλός.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

§ Στην παρούσα Διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πείραμα χύτευσης αλουμινίου με χρήση μηχανής φυγοκεντρικής χύτευσης.

§ Κατά τη διάρκεια του πειράματος, πραγματοποιήθηκε λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας. Θερμοστοιχείο τύπου-Κ ήταν τοποθετημένο σε χαρακτηριστικό σημείο του χυτού. Αποκαλύφθηκε ο τρόπος απόψυξης του μετάλλου καθ' όλη τη διάρκεια της χύτευσης (στερεοποίησης και απόψυξης).

§ Διεξήχθη πλήθος προσομοιώσεων (περί τις 500). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποθηκεύθηκαν συστηματικά, ώστε να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον:

- o για τη δημιουργία βάσης δεδομένων αποτελεσμάτων
- o για την εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου, ώστε να εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα με ταχύτητα, παρακάμπτοντας τη χρονοβόρο διαδικασία της προσομοίωσης.

§ Διερευνήθηκε εκτενώς το κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης ακριβείας, ένας συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (ΣΜΘ) με εκθετική μορφή ($htc = at^{-b} + c$). Η μορφή αυτή, για τη συγκεκριμένη περίπτωση χύτευσης, κρίθηκε ανεπαρκής να περιγράψει το φαινόμενο.

§ Η χρήση συντελεστή μετάδοσης θερμότητας που προτείνεται από τη βιβλιογραφία για την προσομοίωση της συγκεκριμένης χύτευσης, δίνει αποτέλεσμα που απέχει πολύ από το πείραμα. Προσεγγίζει την καμπύλη απόψυξης αρκετά επιτυχώς στο πρώτο στάδιο απόψυξης (χρόνος έναρξης στερεοποίησης προσεγγίζεται με σφάλμα 20%). Ωστόσο, ο χρόνος λήξης της στερεοποίησης (χρόνος στερεοποίησης) προσεγγίζεται με σφάλμα 400%.

§ Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων a, b και c της εκθετικής μορφής ($htc = at^{-b} + c$) του ΣΜΘ, συνοψίζονται στα παρακάτω επιμέρους συμπεράσματα:

§ Από τη διερεύνηση όλων των συνδυασμών τιμών για a = [200 600 1200], b=[0.1 0.6 1.2] και c=[0 200 600], προκύπτει πως όλες οι περιπτώσεις δίνουν αποτελέσματα που απέχουν πολύ από το πείραμα. Οι τιμές a, b και c αυτές, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για το 1ο και το 3ο στάδιο της απόψυξης αλλά επιμηκύνουν κατά πολύ το 2ο στάδιο. Για προσομοιώσεις με c=600 (άνω όριο εκ των τιμών που δοκιμάστηκαν), οι καμπύλες απόψυξης έρχονται όλο και πιο κοντά στην πειραματική.

- Η μορφή του ΣΜΘ $htc = at^{-b} + c$ θα πρέπει να έχει *πάντα τιμή* $c \neq 0$ και θα πρέπει να είναι *όσο το δυνατόν μεγαλύτερη* διότι καθορίζει το 2ο στάδιο της διαδικασίας προσομοίωσης.
- Από τη διερεύνηση όλων των συνδυασμών τιμών για a = [200 600 1200], b=[0.1 0.6 1.2] και c=[0 200 600 1000 2000 3000 4000 5000 6000], προκύπτει πως όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου c, τόσο περιορίζεται το 2ο στάδιο στην καμπύλη απόψυξης.
- Η παράμετρος b επηρεάζει το ρυθμό μείωσης του συντελεστή. Η παράμετρος b αν και επηρεάζει ελαφρά την κλίση της καμπύλης απόψυξης στο 3ο στάδιο, δεν συμβάλλει δραστικά στην αλλαγή των καμπύλων σε όλη τη διαδικασία της απόψυξης.
- Η τιμή της παραμέτρου b που δίνει την καλύτερη προσέγγιση είναι η b=0.1.
- Οι προσομοιώσεις δίνουν καλύτερα αποτελέσματα όταν το άθροισμα των παραμέτρων a+c είναι μεγάλο και όταν ο ρυθμός μείωσης του εκθετικού Σ.Μ.Θ κατά τη διάρκεια της απόψυξης είναι μικρός.
- Η επιλογή των παραμέτρων α, c πρέπει να είναι τέτοιες ώστε το άθροισμα τους να κυμαίνεται στην περιοχή 5000 < a+c < 10000 αλλά και οι τιμές των δυο παραμέτρων ξεχωριστά να μην απέχουν περισσότερο από 4000. Παρόλα αυτά, ακόμα και τότε η προσέγγιση δεν είναι ικανοποιητική. Η επιλογή αυτή, όμως, πρακτικά, μοιάζει με την επιλογή σταθερού ΣΜΘ καθόλη τη διάρκεια της χύτευσης. Συνεπώς, η εκθετική μορφή ΣΜΘ δεν είναι ικανοποιητική για το συγκεκριμένο είδος χύτευσης.
- Η επιλογή σταθερού ΣΜΘ για όλη τη διάρκεια χύτευσης κρίθηκε ανεπαρκής.
- Μελετήθηκε η περίπτωση να διακριτοποιηθεί το πεδίο ορισμού του ΣΜΘ ως εξής:

$$htc = \begin{cases} at^{-b} + c_1 , & 0 < t < 100\sec \\ c_2 , & 100 < t \end{cases}$$

, δηλ. ο συντελεστής να έχει εκθετική κατά τα δύο πρώτα στάδια της απόψυξης και στο τρίτο στάδιο να έχει σταθερή τιμή, διαφορετική από τις τιμές που είχε νωρίτερα.

- Κατόπιν διεξοδικής διερεύνησης των τιμών των παραμέτρων a, b, c_1 και c_2 επετεύχθη ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης απόψυξης.

- Η παραμετροποίηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μπορεί να γίνει ως εξής : στο 1ο και 2ο στάδιο της απόψυξης ο συντελεστής έχει εκθετική μορφή $htc = at^{-b} + c$ με παραμέτρους a, c να έχουν τιμές τέτοιες ώστε ο αρχικός Σ.Μ.Θ $a + c$ να βρίσκεται στην περιοχή $5000 < a + c < 12000$ και η παράμετρος b να έχει μικρή τιμή . Χαρακτηριστική τιμή είναι η $b = 0.1$. Στο 3ο στάδιο, που είναι το στάδιο μετά το πέρας της στερεοποίησης ο συντελεστής παίρνει πλέον μικρή τιμή της τάξης των $30 \, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot k} - 100 \, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot k}$.
- Ο αρχικός Σ.Μ.Θ (IHTC) γενικά έχει μεγάλες τιμές. Αυτό συμφωνεί με το γεγονός ότι το τηγμένο μέταλλο που βρίσκεται σε μεγάλη θερμοκρασία (και έχει αρκετά μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά με το καλούπι) έχει πολύ καλή πρόσφυση με το καλούπι κι έτσι ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας είναι υψηλός.
- Η τιμή που έχει ο ΣΜΘ στο χρονικό διάστημα 30-100sec είναι λογικό που είναι κατά πολύ χαμηλότερη από την αρχική τιμή του ΣΜΘ. Η τιμή, όμως, που αριθμητικά δίνει καλή προσέγγιση είναι αρκετά υψηλή από την πλευρά της φυσικής σημασίας, δεδομένου ότι στο στάδιο αυτό το χυτό συστέλλεται, η πρόσφυση των δύο επιφανειών δεν είναι καλή και η μετάδοση θερμότητας μειώνεται πολύ. Ενδεχομένως, δικαιολογείται από το γεγονός ότι λόγω της φυγοκέντρισης, η στερεοποιημένη επιφάνεια του μετάλλου ωθείται στην επιφάνεια του καλουπιού. Η πιστοποίηση αυτού, χρήσει περαιτέρω διερεύνησης.
- Η μορφή του ΣΜΘ που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα δεν είναι αυτή που προτείνεται από τους (Dong et al.), αλλά αυτή που προτείνεται ποιοτικά από τους (Lau et al.).